

Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava

Fakulta elektrotechniky a informatiky

Katedra telekomunikační techniky

**Vliv gama záření na útlum konvenčních
optických vláken**

**Influence of Gamma Radiation on
Attenuation of Conventional Optical Fibers**

Zadání bakalářské práce

Student:

Stanislav Mikulénka

Studijní program:

B2647 Informační a komunikační technologie

Studijní obor:

2601R013 Telekomunikační technika

Téma:

Vliv gama záření na útlum konvenčních optických vláken
Influence of Gamma Radiation on Attenuation of Conventional Optical
Fibers

Zásady pro vypracování:

1. Zpracujte problematiku zabývající se vlivem účinků gama a neutronového záření na chování optických vláken.
2. Proveďte počáteční měření optických vláken.
3. Proveďte měření daných úseků vláken po různých expozicích gama záření.
4. Vyhodnoťte naměřené výsledky.

Seznam doporučené odborné literatury:

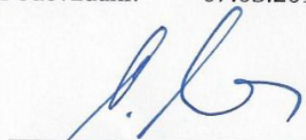
HABER, J.B., E.W. MIES, J.R. SIMPSON a S.F. WONG. Assessment of radiation-induced loss for AT. Journal of Lightwave Technology. vol. 6, issue 2, s. 150-154. DOI: 10.1109/50.3982.
WEST, R.H. A local view of radiation effects in fiber optics. Journal of Lightwave Technology. vol. 6, issue 2, s. 155-164. DOI: 10.1109/50.3983.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

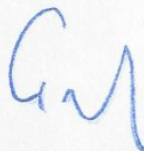
Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Martin Pápeš**

Datum zadání: 01.09.2013

Datum odevzdání: 07.05.2014



doc. Ing. Miroslav Vozňák, Ph.D.
vedoucí katedry

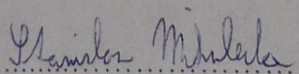


prof. RNDr. Václav Snášel, CSc.
děkan fakulty

Místopřísežné prohlášení

„Místopřísežně prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci vypracoval samostatně.“

V Ostravě 5.5. 2014


.....

Stanislav Mikulanka

Poděkování

Rád bych věnoval poděkování panu Ing. Martinu Pápešovi za podporu při vypracovávání mé bakalářské práce, za jeho cenné rady a za čas strávený při konzultacích, kde mi byly všechny dotazy stručně a jasně zodpovězeny.

Dále bych chtěl panu Ing. Lukáši Bednárkovi za pomoc a odborné rady při měření optických děličů a Ing. Františku Perecárovi poděkovat za srozumitelné vysvětlení práce v softwaru ThorLabs Beam jejíž výsledky jsou také součástí této práce.

Nakonec bych chtěl poděkovat prof. RNDr. Vladimíru Vašínkovi, CSc., který mě i přes organizační problémy, které mě potkaly, umožnil dokončit tuto práci a dále bych chtěl poděkovat přátelům, rodině a všem, kteří mi s touto prací pomohli a nakonec všem čtenářům této práce.

Děkuji

Abstrakt

MIKULENKA, Stanislav. *Vliv gama záření na útlum konvenčních optických vláken*. Ostrava, 2014. Bakalářské práce. VŠB – Technická univerzita Ostrava. Vedoucí práce Ing. Martin Pápeš.

Bakalářská práce se zabývá optickými vlákny, optickými děliči a vlivem gama záření na jejich útlum. V teoretické části jsou popsána optická vlákna, děliče, jejich vlastnosti a příklady jejich aplikace v praxi. Dále popisují optické opakovače, zesilovače a jejich význam pro telekomunikační sítě. Praktická část se zabývá měřením optických vláken a děličů a vyhodnocením naměřených výsledků.

Klíčová slova: AT&T Standard Optického Vlákn, ThorLabs Beam, Optické Děliče, Útlum Konvenčního Optického Vlákn, Gama Záření, Optické Zesilovače,

Abstract

MIKULENKA, Stanislav. *Influence of Gamma Radiation on Attenuation of Conventional Optical Fibers*. Ostrava, 2014. Bachelor thesis. VŠB – Technical university of Ostrava. Supervisor Ing. Martin Pápeš

Bachelor thesis deals with optical fibers, optical coupler and influence gamma radiation on their attenuation. In theoretical part are described optical fibers, couplers their properties and application in practice. I also describe optical repeater, amplifier and their importance for telecommunication sites. The practical part deals measurements of optical fibers and couplers and evaluation of the results.

Keywords: AT&T Standard Optical Fiber, ThorLabs Beam, Coupler, Attenuation of Conventional Optical Fiber, Gamma Radiation, Optical amplifier,

OBSAH

ÚVOD	1
1 OPTICKÁ VLÁKNA	2
2 VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN	3
2.1 Disperze	3
2.2 Vidová disperze	3
2.3 Polarizační vidová disperze	3
2.4 Chromatická disperze	4
2.5 Numerická apertura (NA)	4
2.6 Útlumy na vedení	4
2.6.1 Ztráty absorpcí	5
2.6.2 Rozptylové ztráty	5
2.6.3 Ztráty numerickou aperturou	5
2.6.4 Ztráty průřezem jádra	5
2.6.5 Fernselovy rovnice	5
2.6.6 Další ztráty	5
3 TYPY OPTICKÝCH VLÁKEN	6
3.1 Jednovidová vlákna	6
3.2 Mnohavidová vlákna	7
3.2.1 Vlákna se skokovým indexem lomu	7
3.2.2 Gradientní vlákna	7
3.3 Radiaci odolná vlákna	7
4 OPTICKÉ DĚLIČE	8
4.1 Vlastnosti optických děličů	8
4.2 Aplikace optických děličů v praxi	9
4.3 Předpokládané vlivy ozařování na optické děliče	9
5 ZTRÁTY VYVOLANÉ GAMA ZÁŘENÍM V AT&T STANDARDU OPTICKÝCH VLÁKEN	10
5.1 Gama záření	10
5.2 Měření citlivosti optických vláken na radiaci	10
5.3 Půdní vlivy na optické vlákno	12
5.4 Vlivy radiace ve vnitřních prostorech	13
6 ZESILOVAČE A OPAKOVAČE V TELEKOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMECH	14
6.1 Zesilovače vs. opakovací	14
6.2 Optovláknové zesilovače s aktivním vláknem	15
6.2.1 EDFA zesilovače	15

6.2.2	PDFA zesilovače	16
6.2.3	TDFA zesilovače	16
6.2.4	YDFA	16
6.3	Ramanovské zesilovače	16
7	PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ	18
7.1	Měření optických vláken	18
7.1.1	Svařování optických vláken	18
7.1.2	Měření MFD optických vláken	19
7.1.3	Měření útlumu optických vláken	20
7.1.4	Naměřené hodnoty před ozářením vláken	20
7.1.5	Organizační problémy při druhém měření	21
7.2	Měření optických děličů	22
7.2.1	Naměřené hodnoty před ozářením vláken – první měření	23
7.2.2	Výpočet vložného útlumu	24
7.2.3	Výpočet dělicího poměru	25
7.2.4	Výpočet celkových ztrát	26
7.2.5	Výpočet homogenity ztrát	26
7.2.6	Výkon mezi jednotlivými výstupy pro směrovost	27
7.2.7	Ozařování děličů	28
7.2.8	Naměřené hodnoty po ozáření vláken - druhé měření	29
7.2.9	Naměřené hodnoty výkonů po ozáření	29
7.2.10	Hodnoty vložného útlumu po ozáření	30
7.2.11	Hodnoty dělicího poměru po ozáření	30
7.2.12	Hodnoty celkových ztrát po ozáření	31
7.2.13	Hodnoty homogenity ztrát po ozáření	31
7.2.14	Hodnoty směrovosti pro jednotlivé výstupy po ozáření	32
8	VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ	34
8.1	Vložný útlum	34
8.2	Celkové ztráty	36
8.3	Homogenita ztrát	38
8.4	Hodnoty výkonů jednotlivých výstupů	39
8.5	Hodnoty směrovosti mezi jednotlivými výstupy	40
	ZÁVĚR	42
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	43
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	44
	SEZNAM GRAFŮ	46
	SEZNAM TABULEK	47

ÚVOD

Tématem této bakalářské práce jsou optická konvenční vlákna a děliče, přesněji vliv gama záření na jejich útlum. Optická vlákna mají v dnešní době velké zastoupení mezi vodiči, kde nahrazují v mnoha oblastech metalické vodiče. Důvody jsou zejména jejich menší cena a lepší přenosové vlastnosti. Proto mají optická vlákna velký potenciál pro budoucnost veškerých telekomunikačních systémů a přenosových médií.

Tato bakalářská práce popisuje optická vlákna, typy optických vláken, vlastnosti optických vláken a vlivy způsobující jejich útlum. Právě jedním z těchto vlivů je radiace způsobena kosmickým gama zářením vycházejícím z radioaktivních prvků. Dále popisuje prostředí, ve kterých se optická vlákna mohou nacházet a vliv těchto prostředí na výše zmíněný útlum. S útlumem jsou spojeny také optické zesilovače a opakovače, kterým se rovněž budu věnovat. Také se můžeme dočíst o tom, který z těchto dvou prvků je v současné době ve velké míře v telekomunikačních systémech používán a jakou nedílnou součástí v telekomunikacích představuje. V optických trasách je někdy zapotřebí dvě trasy spojit či naopak rozdělit jednu trasu do dvou. K tomuto účelu slouží optické děliče. Jejich princip a aplikaci popisují v další kapitole.

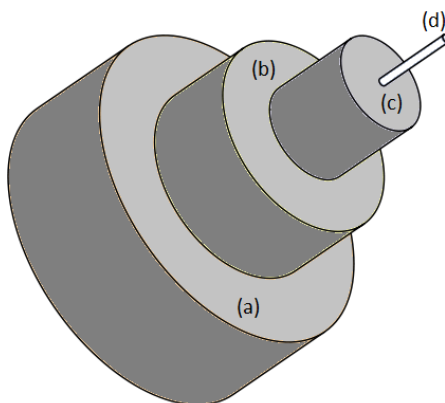
Výše popsanou teorii jsem aplikoval v praktické části, ve které jsem měřil útlum. Po prvním měření byly děliče odeslány na ozařování do reaktoru umístěného v Praze. U těchto děličů proběhla obě měření. Ovšem u optických vláken, která byla poslána na ozařování až následně, se nestihla kvůli organizačním problémům ve výzkumném ústavu v Řeži ozářená vlákna doručit včas zpět ke zpracování dat a měření. Na doporučení garanta oboru prof. RNDr. Vladimíra Vašíňka, CSc. jsem proto do této práce zahrnul také optické děliče. Podílel jsem se na měření, které probíhalo participiálně s panem Ing. Lukášem Bednárkem.

Účelem této práce je zjistit reakce výše uvedených optických prvků na radioaktivní záření a následné změny jejich přenosových vlastností.

1 OPTICKÁ VLÁKNA

Optická vlákna v dnešní době nahrazují především metalické vodiče, které jsou nevýhodné pro svou vysokou cenu, budeme-li uvažovat měděné vodiče, a pro své horší přenosové vlastnosti (kapacita, rychlost přenosu, přenosová vzdálenost a další). Optické vlákno je tvořeno tenkým skleněným nebo plastovým jádrem. Optická vlákna jsou vyráběna v několika standardních průměrech jádra. Aplikace jednotlivých optických vláken záleží na prostředí a typu aplikace. Jedním z nejpoužívanějších optických vláken jsou vlákna dopována křemíkem.

Vznik optických vláken se datuje k roku 1956, kdy byl za pomoci optických vláken vytvořen první gastroendoskop (přístroj pro vyšetření žaludku). Tento vynález odstartoval celou řadu aplikací přenosu obrazu optickými vlákny. „Základním principem fungování optických vláken je jev nazývaný totální reflexe. K tomu dochází, pokud světlo prochází z opticky hustšího prostředí do opticky řidšího a rozhraní mezi těmito dvěma prostředními dosáhne pod úhlem menším než kritickým.“ [1]



Obr. 1 Průřez optickým vláknem

Na Obr. 1 můžeme spatřit průřez optickým vláknem a jeho jednotlivé části. Část (a) je sekundární ochrana vlákna. Ta má za účel zvýšit bezpečnostní parametry vlákna. Není však součástí všech vláken, protože značně zvětšuje jejich průměr. Ovšem vlákna se sekundární ochranou jsou mnohem odolnější proti poškození. Primární ochrana vlákna je na obrázku označena jako část (b). Zajišťuje, aby nedošlo k poškození vnitřních částí vlákna a zvyšuje odolnost proti ohybu a připojují se na ni konektory. Část (c) je plášť optického vlákna. Plášť zabraňuje rozptýlení světelného paprsku z jádra do okolí. Aby vlnovod fungoval i na mnoho kilometrů, musí docházet k totálnímu odrazu paprsku na rozhraní jádra a pláště. Poslední částí (d) je samotné jádro optického vlákna. Uvnitř jádra se šíří světelný paprsek. Index lomu jádra se pohybuje kolem 1,48, což znamená, že světlo se pohybuje 1,48 krát pomaleji než ve vakuu.

2 VLASTNOSTI OPTICKÝCH VLÁKEN

Nejdříve si uvedeme několik vlastností, kvůli kterým se optická vlákna stala nedílnou součástí dnešních komunikačních sítí. Především má optické vlákno obrovskou informační kapacitu, která se teoreticky pohybuje kolem 100 TeraHertz a dokáže překlenout velkou vzdálenost. Tato vzdálenost se určuje z útlumu optického vlákna. Maximální vzdálenost, kterou může infračervený paprsek překlenout, lze prodloužit opakovači. Ty se však dnes již kvůli velkým finančním nákladům nepoužívají v tak velké míře jako dříve a jsou nahrazovány optickými zesilovači. Optické vlákno má taky na rozdíl od jiných komunikačních vodičů výhodu velmi nízké hmotnosti, malých rozměrů a lepší manipulace. Další pozitivní vlastnost optického vlákna je zamezení odposlouchávání, což v dnešní době hodnotím jako velmi pozitivní. [2]

Jedna ze základních vlastností je šířka optického vlákna. Udává nejvyšší možný kmitočet infračerveného signálu, který může být přenesen optickým vláknem na vzdálenost jednoho kilometru bez výrazného zkreslení signálu působením disperze.

2.1 Disperze

Samotná disperze se dělí na tři poddruhy: vidová, chromatická a polarizační vidová disperze. Každá z těchto disperzí se váže k jiným typům optických vláken a ne všechny disperze působí na všechny typy vláken.

2.2 Vidová disperze

Vidová disperze je v optickém vlákně způsobena šířením více vidů s více vstupními úhly a tudíž s odlišnými délkami tras jednotlivých vidů. Tomuto můžeme zamezit použitím gradientních vláken a nebo vláken jednovidových. Jak uvádí autor článku: „Takové jednovidové vlákno musí mít šířku jádra 3,6 krát menší než je vlnová délka přenášeného světla. Pokud je vlnová délka 0,85 μm , pak šířka jádra musí být slabší než 3,1 μm .“ [3]

2.3 Polarizační vidová disperze

Jako druhou disperzí si představíme polarizační vidovou disperzi. Ta se projevuje pouze u vláken jednovidových. Jedná se o jediný vid šířící se optickým vláknem ve dvou vzájemně kolmých polarizačních rovinách. Jakákoliv nesymetrie vlákna, ať už se jedná o mikro ohyby či vnější tlaky na vlákno, způsobují šíření obou polarizací jinou rychlostí. Dnes už se ovšem těchto závad obávat nemusíme, protože dnešní výrobci dodávají optická vlákna

s koeficientem polarizační vidové disperze 0,1, což je hodnota tak malá, že umožňuje přenosy na vzdálenosti několika set kilometrů s rychlostí až 10 Gigabit za vteřinu. [3]

$$PMD = \frac{\Delta T}{L} \left[\frac{ps}{km} \right] \quad PMD = \frac{\Delta T}{\sqrt{L}} \left[\frac{ps}{km} \right]$$

Rovnice 1 Výpočet polarizační vidové disperze

U rovnice na levé straně je výpočet polarizační vidové disperze. Tento výpočet je používán pro krátká vlákna asi do 10 km. U vztahu na pravé straně je výpočet pro opačnou situaci, kdy je délka vlákna větší.

2.4 Chromatická disperze

Světlo putující optickým vláknem je složeno z několika paprsků. Každý z těchto paprsků má jinou rychlost, kterou se šíří optickým vláknem. [3]

Popisující vztah chromatické disperze D, jež je funkcí vlnové délky.

$$D(\lambda) = \frac{dT_{G(\lambda)}}{d(\lambda)} \left[\frac{ps}{nm * km} \right]$$

Rovnice 2 Výpočet chromatické disperze

2.5 Numerická apertura (NA)

Numerická apertura se zabývá šířením paprsku světla v optickém vlákně. Jelikož ne všechno světlo, které se šíří optickým vláknem se dostane až na druhý konec. Bere v potaz index lomu jádra (n_1), index lomu pláště (n_2) a vnější prostředí (vzduch). [3]

$$NA = \sin \gamma = \sqrt{n_1^2 - n_2^2}$$

Rovnice 3 Výpočet numerické apertury

2.6 Útlumy na vedení

Útlumy způsobují ztráty, které si postupně uvedeme níže. Ztrát existuje několik druhů, mohou být způsobeny vadami materiálů a nebo přirozeně délkou daného vedení, kdy putující infračervený signál má ztráty v deciBelech(dB) na uražený kilometr délky(dB/km). Níže si uvedeme jednotlivé typy ztrát a jejich příčiny.

2.6.1 Ztráty absorpcí

Tyto ztráty jsou způsobeny přechody mezi atomárními úrovněmi, molekulárními úrovněmi, příměsí a nečistot. Největší útlumy způsobují OH ionty, jejichž rezonance na některých kmitočtech způsobuje také tepelné ztráty. [3]

2.6.2 Rozptylové ztráty

Rozptylové ztráty se objevují, pokud optické vlákno obsahuje nehomogenity. Jsou-li nehomogenity menší, než vlnová délka záření, jedná se o tzv. Rayleighův rozptyl.

2.6.3 Ztráty numerickou aperturou

Jak bylo uvedeno výše, u numerické apertury ne všechno světlo, které vstoupí do optického vlákna, doputuje až na jeho konec. Ztráty numerickou aperturou vznikají kvůli příliš velkým rozdílům úhlů mezi zdrojovým a přijímacím vláknem. Když je tento rozdíl příliš velký přijímací vlákno už nedokáže pojmout celý rozsah úhlů odrážejícího se světla

2.6.4 Ztráty průřezem jádra

Při spojování optických vláken můžeme narazit na to, že jedno vlákno bude mít menší průřez než druhé. To způsobuje ztráty průřezem jádra u přijímacího vlákna. Takto způsobené ztráty můžeme zmenšit použitím kompresního svazku. [3]

2.6.5 Fernselovy rovnice

Stejně jako u různých průřezů vláken mohou nastat ztráty při spojení dvou vláken s odlišnými indexy lomu jádra. Takové to ztráty se nazývají ztráty Fernselovy rovnice. Ty udávají intenzitu odraženého a lomeného světla. Pokud odraz není úplný tak optické prostředí neodráží všechno světlo, ale určitá část do prostředí vstupuje a lomí se, tím dochází ke ztrátám.

2.6.6 Další ztráty

Další ztráty se kterými se můžeme setkat jsou ztráty jako odchylka os, oddělení konců vláken, ohyb, vazební ztráty a ztráty vyzařováním kdy paprsky světla vyzařují z jádra ven na rozhraní jádra a pláště. [3]

3 TYPY OPTICKÝCH VLÁKEN

Optická vlákna si můžeme rozdělit na tři základní typy:

- jednovidová optická vlákna,
- mnohovidová optická vlákna,
- optická vlákna pro speciální účely.

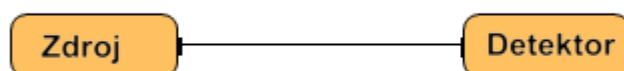
Mezi vlákna pro speciální účely patří např. vlákna s nevláčkovitým jádrem, vlákna s obkládací vrstvou a vlákna odolná vůči radiaci.

V této kapitole budu popisovat jednovidová vlákna AT&T standardu 62,5/125 μm . Tento typ zápisu udává jako první hodnotu 62,5, což označuje průměr jádra. Druhá hodnota 125 je pak průměr pláště. Obě tyto hodnoty jsou udávány v mikrometrech. Dále se budu zabývat mnohavidovými optickými vlákny AT&T standardu 62,5/125 μm a jako posledním mnohavidovými vlákny AT&T standardu 62,5/125 μm odolné vůči radiaci. Konstrukce vláken podle prostředí použití lze ovlivnit především zastoupením jednotlivých chemických prvků či vzácných zemin, kterými můžeme změnit poměr obsažených látek v optickém jádru.

Jak nám uvádí článek: „Analýza vlnovodů ukazuje, že světelná energie ve vláknech není úplně uzavřená v jádře. Místo toho, hlavně u jednovidového vlákna, je výrazný podíl energie i v plášti okolo jádra.“ [4]

3.1 Jednovidová vlákna

Jednovidové optické vlákno je charakteristické malým průměrem jádra nanejvýš do 10 μm . Průměr se většinou pohybuje v rozmezí 8-10 μm . Menší jádro má za následek větší úhel odrazu paprsku šířícího se jádrem, který zkracuje dráhu šířícího se paprsku světla. Díky této vlastnosti je jednovidové vlákno v praxi používáno především pro přenos dat na větší vzdálenosti (např. mezi městy). Jednovidové vlákno má jádro z větší části složeno z germania a ve vnitřním plášti má přidán fluorin s menším množstvím fosforu. [4]



Obr. 2 Jednovidové optické vlákno

3.2 Mnohavidová vlákna

Mnohavidové optické vlákno je používáno nejčastěji pro komunikaci na kratší vzdálenosti (např. uvnitř budovy či areálu). Germanium určuje index lomu světelného paprsku putujícího vláknem a fosfor snižuje pracovní teplotu. Mají větší průměry jádra než je tomu u vláken jednovidových, jejich průměr bývá větší než 10 μm . Mnohavidová vlákna se dělí na dva typy:

- gradientní vlákno,
- vlákno se skokovým indexem lomu. [1]

3.2.1 Vlákná se skokovým indexem lomu

Jsou typická tím, že do vlákna vstupují paprsky světla, které jsou vedeny vláknem podél jádra pomocí totální reflexe. Používají se na kratší vzdálenosti a jejich nevýhodou je vidová disperze. [5]

3.2.2 Gradientní vlákna

Gradientní vlákna jsou tvořena z tisíce tenkých vrstev a ty se liší indexem lomu. Paprsek světla šířící se ve vláknech opisuje sinusovou křivku a jeho index lomu se zmenšuje s jeho vzdáleností od středu vlákna. Tento jev má za následek menší zkreslení signálu, což snižuje vidovou disperzi. [6]



Obr. 3 Mnohavidové optické vlákno

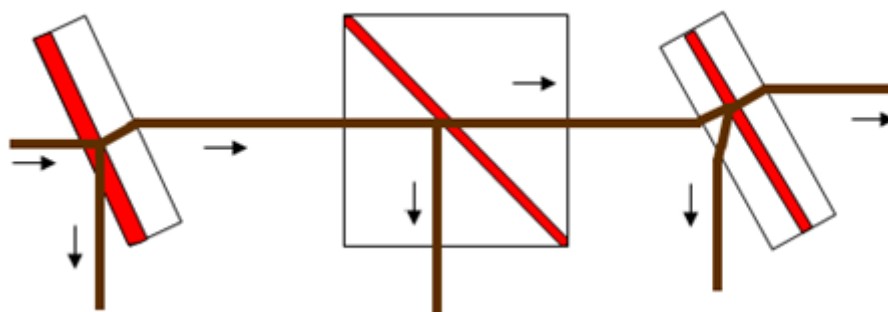
3.3 Radiaci odolná vlákna

Mnohavidové vlákno, přestože je odolné vůči radiaci, tak vůči ní není zcela imunní. Radiace má pouze na zvětšení jejich útlumu menší vliv než na ostatní vlákna. Radiace působí méně především díky germaniu obsaženému ve vlákně a na rozdíl od klasických mnohavidových vláken tyto neobsahují ve svém jádru žádný fosfor. Tato vlákna mají přibližně o 10 řádů nižší faktor útlumu vlivem radiace. Radiaci odolná mnohavidová vlákna se používají hlavně v prostředí se zvýšenou radiací, jako jsou například prostory jaderných elektráren nebo vojenské prostory. [7]

4 OPTICKÉ DĚLIČE

Optické děliče, nebo-li couplery, jsou pasivní optické prvky. Pod pojmem pasivní prvek si můžeme představit například datové rozvaděče, kabeláže nebo výše uvedené děliče. Jinými slovy jsou to prvky, které fyzicky přenášejí data. Optický dělič je prvek, který buďto optický výkon rozděluje z několika zdrojů do jednoho nebo naopak signál z více zdrojů spojuje.

Optické děliče fungují na principu rozdělení paprsku světla pomocí dvou trojbokých hranolů, může se také použít planparalelní deska. Tyto dělicí vrstvy mají za úkol, aby jedna část paprsku světla pokračovala v původním směru a druhá část byla záměrně odražena do směru, ve kterém chceme aby paprsek pokračoval. [8]



Obr. 4 Dělení paprsků světla optickým děličem

4.1 Vlastnosti optických děličů

Jedna ze zajímavých vlastností, kterou optické děliče mají je, že nezáleží na přenosovém protokolu ani na přenášených rychlostech signálu. Jediná věc, na kterou si musíme dávat při používání děličů pozor, je typ použitého optického vlákna. U jednovláknových vláken je to vlákno typu 9/125 μm a u mnohovidového vlákna 50/125 μm nebo 62,5/125 μm . Optické děliče taky mají určité nevýhody. Se signálem, který jimi rozdělujeme, dělíme také jeho optický výkon. V praxi se ve většině případů používá jedna z těchto možností poměrů dělení, buďto 50/50, 70/30 a nebo 90/10 (uvedené příklady jsou v procentech). Je možno využít také jiných poměrů dělení signálu, ale výše uvedené většinou postačí. V praxi při návrhu optické trasy počítáme s určitými útlumy na vedení a proto máme vždy výkonovou rezervu, která se nám právě v těchto případech hodí. [9]

4.2 Aplikace optických děličů v praxi

Aplikace optických děličů nachází využití v optických trasách, kde potřebujeme daný signál rozdělit nebo spojit. Typicky se používá dělení signálu z jednoho vstupu na dva výstupu a naopak. Rozdělenému signálu dále můžeme určit jakým poměrem se bude v děliči dělit. Tento poměr určíme dle vlastní potřeby. Pro jednovidová vlákna se nejčastěji využívá kombinace dvou signálů o vlnových délkách 1310 nm a 1550 nm. Další variantou optických děličů jsou děliče pro vlnovou délku 650 nm. Tento typ má speciální použití pro VFL zdroje a rozdělení jejich výkonů do více směrů. Pro přiblížení VFL jsou zdroje červeného světla o vlnové délce 650 nm a používají ke zkoušení optických tras, přesněji hledání chyb v těchto trasách, kde pomocí pronikavého červeného světla rychle najdeme chybu ve zkoušené trase.

Optické děliče dále nacházejí uplatnění v množství zařízení, se kterými se můžeme dnes a denně setkat. Jsou to například data projektory, laserové systémy a další. [9]

4.3 Předpokládané vlivy ozařování na optické děliče

Optické konvenční děliče jsou vyráběny ze stejných materiálů jako optická vlákna, tudíž můžeme při jejich ozařování očekávat podobné vlivy na jejich funkčnost. Radioaktivní vlivy narušují strukturu děličů a tím pádem by přenos paprsku od ozářeného děliče neměl být již tak kvalitní. Nejočekávanějším jevem by měl být nárůst útlumu, který by se v extrémních případech zvýšit až o několik desetin deciBell. U děličů můžeme pomocí výpočtu zjistit několik dalších veličin jako jsou například dělicí poměr, homogenita útlumu, celkové ztráty nebo směrovost. U všech těchto přenosových vlastností je také očekávaná snížení kvality přenosu signálu. Výše uvedené předpokládané vlivy ozařování na optické děliče jsou doloženy v praktické části této práce.

5 ZTRÁTY VYVOLANÉ GAMA ZÁŘENÍM V AT&T STANDARDU OPTICKÝCH VLÁKEN

Jedním z nežádoucích efektů radiačního záření na optické vlákno je narušení jeho struktury a tím pádem zvyšování útlumu. Citace autora článku: „Když jsou optická vlákna vystavena radiačnímu záření, dojde ke dvěma základním interakcím mezi dopadající radiací a jádrem vlákna, atom může být přemístěn pružným rozptylem a elektron může být ionizovaný“. [7]

5.1 Gama záření

Toto vysoce pronikavé energetické elektromagnetické záření často vzniká při radioaktivním rozpadu, kdy po vyzáření alfa nebo beta částic nezůstává jádro vždy stabilní a nadbytečná energie se uvolňuje jako gama záření. Gama záření je ionizující záření o energii fotonu nad 10 keV a dokáže pronikat do materiálů lépe než alfa či beta záření. Gama záření má vlnovou délku kratší než 124 pm. Gama záření objevil v roce 1900 francouzský chemik a fyzik Paul Ulrich Villard při studii uranu. Prvně bylo gama záření považováno za stejný druh záření jako alfa či beta. Ovšem v roce 1914 Ernest Rutherford a Edward Andrade změřením jeho vlnové délky dokázali, že je to druh elektromagnetického záření. [10]

Gama záření však má škodlivý vliv nejen na živý organismus. Používá se například pro hubení bakterií při sterilizaci lékařských nástrojů, k řízeným změnám v organické tkáni, záření také aktivuje některé chemické reakce a proto se využívá při chemické výrobě. Ačkoliv radioaktivní gama záření způsobuje rakovinu, používá se i při její léčbě. [6]

Jak je uvedeno v dokumentu [11]: „Nejenergetičtější částí elektromagnetického spektra s nejvyšší frekvencí je gama záření. Kvůli vysoké energii může vznikat pouze v nejenergetičtějších procesech ve vesmíru. Gama záření z kosmu je absorbováno atmosférou a není přímo pozorovatelné. K jeho měření je proto potřeba speciální techniky Červenkových teleskopů. Gama záření nám umožňuje studovat procesy odehrávající se ve velmi aktivních objektech jako jsou supernovy, černé díry, mikrokvasary, centrum naší Galaxie a další. Gama záření nám také přináší informace o urychlování kosmického záření“.

5.2 Měření citlivosti optických vláken na radiaci

Měření citlivosti optických vláken na radiaci spočívá v proměření vláken před a po ozáření a následném porovnání naměřených hodnot. Jednotka rad, kterou budeme používat, je jednotka dávky ionizujícího záření.

Jak popisuje autor článku [7]: „Lineární extrapolace z LDR testu je hlavně používaná k předvídání dlouhodobých ztrát v typických prostředích.“

Pro zajímavost uvádím překlad článku zabývající se měřením vlivu radiace na optická vlákna - Assessment of Radiation-Induced Loss for AT&T Fiber-optic Transmission Systems in the Terrestrial Environment:

Jednotlivé vzorky vláken o délce 3 km, což je průměrná délka rozpětí dálkových spojů, byly namotány na cívky. K samotnému ozáření vláken byl použit chemický prvek Cesium 137, který se vyznačuje velkou radioaktivitou. Další důležitou věcí je po dobu celého měření zamezit osvětlení, které by mohlo ovlivnit výsledky měření. Pro ozařování byla použita metoda LDR (Low Dose Rate) testu v překladu ozařování malými dávkami radiace. Ozařování probíhalo v dávkách 5 rad za hodinu, což je celková dávka přibližně 1000 rad při stabilní teplotě 20 °Celsia. Tím, že byla vlákna namotána na cívkách, které se otáčely, se dosáhlo rovnoměrného ozáření vláken a předešlo se náhodným chybám v měření. Ihned po dokončení ozařování byla vlákna znovu přeměřena pro dosažení co nejpřesnějších výsledků. Dále musel být použit optický výkon nižší než 10 μW k předejití fotobělení (tzv. Photobleaching) z přenášeného signálu. [7]

Jak si můžeme přečíst ve článku [7]: „Z výsledku lze vidět, že citlivost jednovidových vláken jsou v řádu desítek mdB/km/rad. Standardní mnohavidové vlákno má citlivost přibližně o 10 řádů vyšší než stejná jednovidová vlákna. Radiaci odolné mnohavidové vlákno je přibližně desetkrát citlivější než standardní mnohavidové vlákno s průřezem 0,85 μm a stokrát citlivější než vlákno s průřezem 1,3 μm .“

Vlnová délka (μm)	Standardní jednovidová vlákna	Standardní mnohavidové vlákna	Radiaci-odolné mnohavidové vlákna
0,850	-	8,7	0,98
1,310	0,45	3,4	0,05
1,550	0,7	-	-

Tabulka 1 Radiační citlivost při LDR testu AT&T jednovidových vláken a mnohavidových vláken standardu 62,5/125 μm (mdB/km/rad)

Z tabulky vyplývá, že nejvíce bylo poškozeno mnohavidové vlákno při vlnové délce 850 nm a nejméně radiaci odolné vlákno při vlnové délce 1310 nm.[7]

5.3 Půdní vlivy na optické vlákno

Pokud chceme předcházet zbytečným ztrátám v optických vláknech, musíme si detailně nastudovat prostředí, ve kterém vlákno používáme a jeho vliv na vlákno samotné. Útlumy na vedení optických vláken způsobeny gama zářením se nemusí projevovat pouze u vedení vláken na povrchu, nýbrž radiace působí i na vedení umístěna v podzemí ve vrchní kůře planety Země a to ve formě radioaktivních prvků. Z těchto prvků mají největší vliv radioaktivní nuklidy pocházející z urania (^{238}U), potassia (^{40}K) a thoria (^{232}Th). Tohle jsou tři primární zdroje ionizačního záření v horní kůře Země. Kromě těchto radioaktivních prvků může na optické vlákno vedené pod povrchem působit několik dalších vlivů, například malé dávky kosmické radiace. [7]

Studie dále prokázala, že koncentrace takto radioaktivních prvků bývá pouze v oblastech, které nejsou více než několik kilometrů široké. Jak je uvedeno ve studii: „Dřívější studie složení zemské kůry provedené pomocí analýzy dat z hornických zpráv, ropných vrtů, radiometrických antén a map koncentrací materiálů se odhaduje, že optický kabel v průměrném podzemním prostředí získává roční dávku záření 120 mrad ročně. Navíc jakákoliv území se zvýšenou koncentrací těchto prvků jsou neobvyklá a patrně dobře zdokumentovaná.“ Tím pádem pravděpodobnost, že by celé vedení bylo umístěno v takovém to území, je značně mizivá. Ve většině prostředí, kde jsou vedeny optické kabely, radiace nepřesahuje dávku 150 mrad ročně. [7]

Vedení	Délka rozpětí (km)	Ztráty na vedení jednovláknového vlákna za periodu dvaceti let
FT-Series G (1,3 μm)	30-40	0,04-0,05
FT-Series G (1,5 μm)	30-40	0,06-0,08
DDM-1000 (1,3 μm)	20-50	0,03-0,07
FTX-180 (1,5 μm)	20-50	0,03-0,07

Tabulka 2 Hodnota ztrát vyvolaných radiačním zářením na dálkovém vedení jednovláknových optických vláken v pozemním prostředí za dvacetiletou periodu.

V tabulce můžeme vidět tři typické AT&T datové spoje používající jednovláknová vlákna pro dálkové vedení. U žádného z těchto produktu ztráty nepřesahují 0,08 dB, což je při takto dlouhém vedení zanedbatelná hodnota. [7]

5.4 Vlivy radiace ve vnitřních prostorech

Při určování velikosti dávky radiace vnitřních prostor se nesmí zapomenout vzít v úvahu radiace pocházející z venkovního prostředí. Radiace z venkovního prostředí používá zdi budovy jako vodič a prostupuje jimi do samotného vnitřního prostoru budovy. Jak víme v podzemním prostředí je průměrná hodnota radiace uváděna přibližně 150 mrad ročně, vnitřní prostory jsou na tom o něco lépe. Jedna studie prokázala, že ve Spojených státech Amerických ve městě Atlanta se vnitřní úroveň radiace v kancelářských budovách pohybuje mezi 20 - 100 mrad ročně. V takových prostorách se nejčastěji používá optické vlákno pro aplikace LAN místní sítě, dá se tedy předpokládat, že délka vedení nebude delší než několik kilometrů. Proto se u těchto vedení používají primárně mnohavidové typy optických kabelů. [7]

Jak se můžeme dočíst v článku [7]: „Zdá se nepravděpodobné, že by celková úroveň radiace tedy radiace vycházející ze zdí budovy a venkovní radiace, která proniká do budovy za normální okolností, přesáhla dávku radiace 100 mrad ročně, proto se hodnota 100 mrad ročně používá jako průměrná odhadovaná hodnota záření ve vnitřních částech budov, kde se používá LAN a ODL.“

6 ZESILOVAČE A OPAKOVAČE V TELEKOMUNIKAČNÍCH SYSTÉMECH

Zesilovače mají zásadní roli v oblasti dnešních telekomunikačních systémů a během několika posledních let měly velký vliv na rozvoj a ekonomiku v telekomunikační oblasti. Maximální délku rozpětí, po které je optické vlákno možno přenášet infračervený signál putující v jeho jádru, nejvíce ovlivňují dvě vlastnosti. Jsou jimi útlum a disperse. Útlum vzniká kvůli chybám a částečné průhlednosti skleněné matrice a způsobuje snižování amplitudy signálu během šíření paprsku. Zatímco disperse způsobuje rozostření signálu a to kvůli rozdílným vlnovým délkám putujícími rozdílnými rychlostmi.

Negativnímu vlivům disperse na přenášený signál lze částečně předcházet použitím vhodného typu optických vláken. Popis je uveden ve článku Optické zesilovače v telekomunikačních systémech: „Typický útlum křemenných optických vláken je řádově 0,2 dB/km u průměru 1550 nm a 0,35 dB/km u průměru 1310 nm. Na druhou stranu disperse prakticky mizí v konvenčních jednovíkových vláknech - viz článek mezinárodní telekomunikační unie (ITU-T) doporučení G.652 při průměru 1310 nm, zatímco vlákna 1550 nm dosahují hodnot okolo 17 ps/(nm*km). Vlákna vyrobena pro přenosy 1550 nm mají disperzní koeficient blízký se nule s maximální tolerancí 2-3 ps/(nm*km). Tyto údaje znamenají typický útlum pro vzdálenost 60-70 km u vlnových délek 1310 nm a 100-120 km u délek 1550 nm.“ [12]

6.1 Zesilovače vs. opakovací

Optické zesilovače mají v dnešní době za úkol především snížit počet opakovacích. Na první pohled by se dalo říci, že opakovací plní víceméně stejný úkol jako zesilovače, tj. zregenerování optického signálu. Ovšem zdání klame a opakovací nebo-li regenerátory signálu mají celou řadu nevýhod.

Hned první a taky asi nejdůležitější nevýhoda, kterou si uvedeme a kvůli které opakovací nahrazují zesilovače, jsou finanční náklady. Ty jsou u opakovacích značně vyšší a i díky nim zesilovače v poslední době ovládají telekomunikační trh. Zvýšené náklady se netýkají pouze opakovacích jako takových, ale z velké části nižší kapacity tras a možnost prodloužit délku dálkových tras vedení díky větší účinnosti zesilovačů. Jako další podstatnou nevýhodu opakovacích je jejich schopnost opakovat nebo-li zregenerovat pouze jedinou vlnovou délku. Narozdíl tomu zesilovače dokážou zesílit celý rozsah vlnových délek na jednom vlákne a to s větší účinností. Jako další nevýhoda opakovacích je nutnost převádění optického signálu na

elektrický a po zesílení signálu zpátky na optický. Abychom si zesilovače neuváděli jako bezchybná zařízení, musíme si uvést některé z jejich negativních vlastností. Základní parametr zesilovačů, podle kterého můžeme zesilovače hodnotit, je poměr výkonu ku poměru šumu. [13]

Z těchto poznatků si můžeme představit, jak důležitou roli hrají zesilovače v telekomunikacích a jak velký potenciál představují pro další generace telekomunikačních sítí. V dnešní době existuje několik typů zesilovačů, které se používají v telekomunikační oblasti. Zesilovače se dělí na tři základní kategorie:

- optovláknové zesilovače,
- polovodičové zesilovače,
- Ramanovské zesilovače. [12]

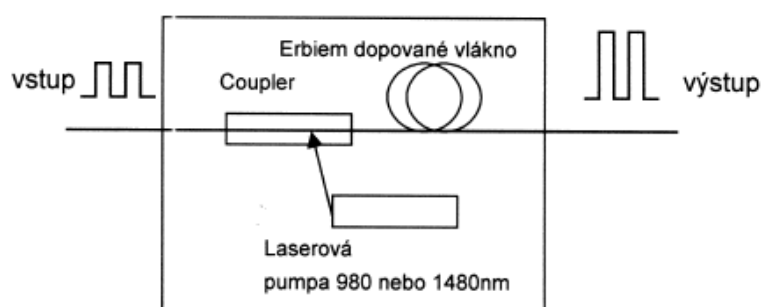
Níže si některé druhy zesilovačů představíme o něco blíže.

6.2 Optovláknové zesilovače s aktivním vláknem

Optovláknové optické zesilovače se vyznačují tím, že používají samotné optické vlákno jako médium pro zesílení putujícího infračerveného signálu. Samotné optovláknové zesilovače se podle principu fungování a příměsi dopované optické vlákno dále dělí na několik typů: EDFA, PDFA, TDFA, YDFA.

6.2.1 EDFA zesilovače

Jedná se o optovláknové zesilovače, které pro svou činnost využívají erbiem (Er) dopovaná optická vlákna. Samotný princip laserové diody byl objeven v šedesátých letech minulého století, ovšem kvůli špatné dostupnosti laserových pump došel ke svému plnému uplatnění až v polovině osmdesátých let. Jak popisuje část o EDFA zesilovačích: „Zisk pásmové šířky z rozsahů EDFA zesilovačů je přibližně od 1520 po 1570 nm. Typické hodnoty pro signálový zisk 30-40 dB pro pumpu o výkonu 50-100 mW.“ [14]



Obr. 5 Blokové schéma EDFA zesilovače

EDFA zesilovače našly díky svým vlastnostem uplatnění v široké oblasti telekomunikačních systémů, jako jsou např. vícekanálové zesílení, analogové aplikace nebo kabelové televize.

6.2.2 PDFA zesilovače

Stejně jako u EDFA optovláknových zesilovačů tak i PDFA využívá optického vlákna jako média pro zesilování signálu. Ovšem namísto erbia, které využívají EDFA zesilovače, PDFA se liší typem používané látky, kterou jsou křemíková vlákna dopovaná. Touto látkou je u PDFA vzácná zemina prazeodym (Pr). PDFA zesilovače jsou používány pro rozsah pásma od 1280-1320 nm. Jak uvádí [13]: „Zesilovač PDFA lze s výhodou použít k zesílení datových přenosových systémů nebo signálů CATV v pásmu 1310 nm. Nicméně i využití pro telekomunikační přenosy může vnést nové pohledy na návrh dálkových nebo vysokorychlostních datových přenosových tras.

PDFA optovláknový zesilovač tak umožňuje vyšší měrný útlum optických vláken a dosahuje velmi nízkých hodnot chromatické disperse i u dálkových vedení. PDFA zesilovač nachází své uplatnění především pro praktické aplikace. [12]

6.2.3 TDFA zesilovače

TDFA optovláknové zesilovače se vyznačují svými unikátními fluoridovými optickými vlákny dopované thuliem(Th). TDFA zesilovače mají pracovní pásmo v rozsahu 1460 – 1490 nm. TDFA je známá pro své fluoridové vlákna, které se hůře vyrábějí a mají nižší odolnosti vůči vnějším vlivům. Samotné zesilovače se potom využívají pro různé vědecké aplikace, testování a měření. [12]

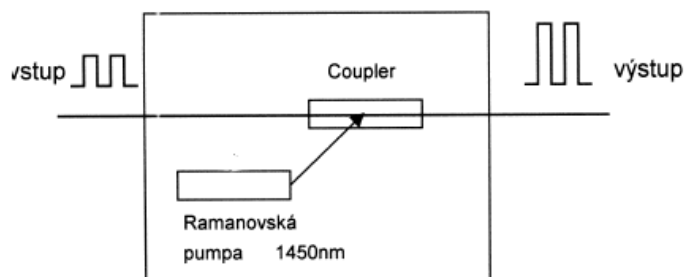
6.2.4 YDFA

Jako poslední optovláknové zesilovače si uvedeme zesilovače YDFA. Ty používají pro dopování optických vláken látku pojmenovanou Yterbium(Yb). Samotné zesilovače se pak používají nejčastěji v odvětví těžkého průmyslu a zpracování materiálu. [13]

6.3 Ramanovské zesilovače

Ramanovské zesilovače jsou druhým odvětvím ve třídě optovláknových zesilovačů. Takzvaný Ramanovský efekt je druh nelineární interakce, kdy se vytváří stimulovaný Ramanovský rozptyl, který probíhá při vysokých výkonech v materiálu optického vlákna. Tento

Ramanovský rozptyl probíhá na principech interakce mezi fotony a fonony pomocí pumpy nebo-li čerpadla, které se používá jako budič. Při tomto jevu vzniká postranní pásmo, které je posunuto z původní frekvence o velikost frekvence fononu. Ramanovské zesilovače se vyznačují tím, že nejsou tak výkonné jako výše uvedené EDFA zesilovače, ale zato se dají použít k zesílení libovolné vlnové délky. V praxi se využívají pro navýšení kapacity datové sítě. Tyto Ramanovy zesilovače vykazují malé zisky přibližně okolo 30 dB a saturace výkonu až +25 dB jsou vhodné pro aplikace zesílení signálu[12]



Obr. 6 Blokové schéma Ramanovského zesilovače

7 PRAKTICKÁ ČÁST – MĚŘENÍ

V této části bakalářské práce se budu zabývat praktickou částí, která bude obsahovat popis postupu před zahájením samotného měření, práci s optickými vlákny (začišťování, lámání a svařování optických vláken) a měření optických vláken a děličů.

7.1 Měření optických vláken

Před měřením se musela vlákna přemotat z originálních cívek na menší návinky z důvodu velikosti reaktoru. Následně se vlákna přemotala na požadované délky 200 metrů. Měření a veškeré práce spojené s touto prací pak probíhaly v laboratořích a učebnách v budově na Krásnopolské.

Po přemotání obou vzorků jednovidového i mnohovidového vlákna přišlo na řadu začišťování, lámání a následné navařování tzv. pigtailů. Pigtail se používá jako převzatý název z angličtiny pro zakončení optického vlákna.

7.1.1 Svařování optických vláken

Při svařování optických vláken budeme potřebovat: sadu bezchloupkových kapesníků, lahvičku s izopropylalkoholem, ochranu svárů, stahovací kleště (Miller), svářečku optických vláken (Sumimoto Type-39) a zalamovačku optických vláken, která je součástí svářecí sady.

Musíme dodržovat následující postup: kleštičkami odstraníme z vlákna primární (je-li přítomná pak i sekundární ochranu). Některá vlákna mívají pouze primární ochranu, v našem případě to byla jednovidová vlákna. Tento typ vláken má mnohem menší průměr a díky tomu se využívá v různých přístrojích a zařízeních, kde by sekundární ochrana byla jen na obtíž. Chybějící sekundární ochrana značně stěžuje samotnou manipulaci a práci s optickým vláknem. Tyto vlákna se pak stávají mnohem náchylnější na zlomení.

Po odstranění ochrany se na jedno ze svařovaných vláken navlékne ochrana pro svár. Ikdyž se to může zdát zbytečné je lépe tento krok udělat dříve, protože v případě opomenutí můžeme svařené vlákna bez ochrany rozstříhnout a celý proces opakovat od začátku.

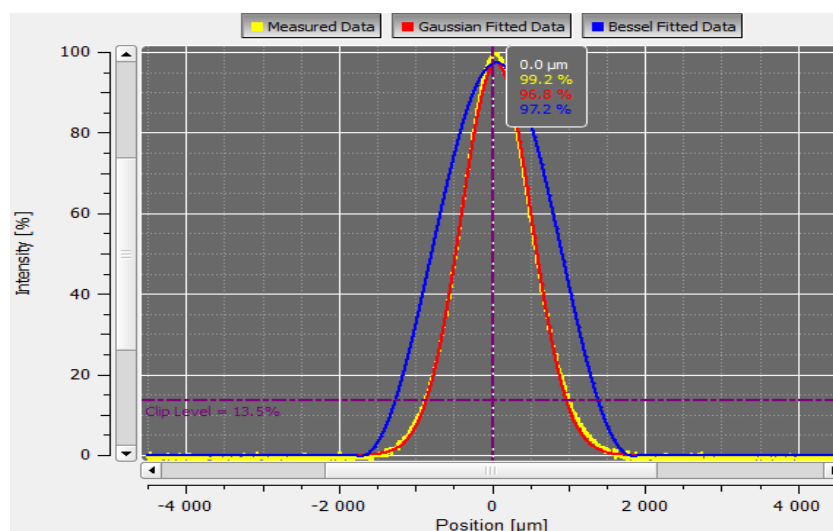
Následuje zalamování vláken. Vlákna vkládáme do lámačky podle toho zda-li na sobě mají i sekundární nebo pouze primární ochranu. Vlákna bychom měli vkládat tak, aby byla vložena kolmo k lámacímu noži a tím pádem byl konec vlákna co nejrovnější pro následný optimální svár. Když máme oba konce vláken, která chceme svařovat rovně zalomená, můžeme je vložit a připevnit do svářečky. Vlákna do svářečky vkládáme asi milimetr od elektrody. Svářečka

nám po zaklapnutí víčka zobrazí pohled z osy X a Y na obě svařovaná vlákna a proto ještě můžeme opravit případné špatné zalomení optického vlákna. Svářečka je plně automatická. Vložíme vlákna, zaklapneme víčko a svářečka další kroky včetně optimálního přisunutí vláken a rozpoznání typu vlákna provede sama. Po zhotovení sváru svářečka zobrazí odhadovaný útlum sváru který umožní svár na poslední chvíli opravit a nemusíme tak zbytečně používat ochranu na špatný svár, který bychom museli dělat znova. Při hodnotách do 0,02 dB můžeme přistoupit k dalšímu kroku a tím je zapečení ochrany sváru. Po zapečení ochrany je svár hotov o čemž se můžeme dotykem přesvědčit (horkou ochranou sváru).

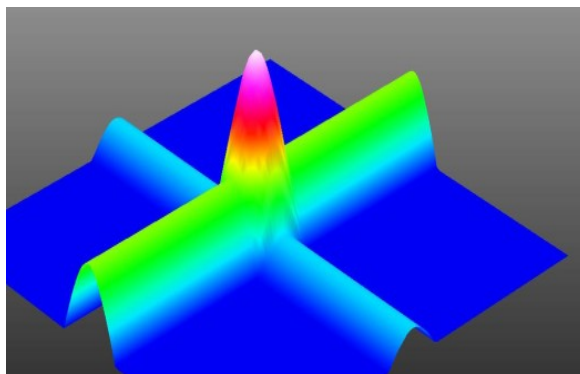
Obdobně jsem postupoval i u dalších třech vzorků. U jednovíkových vláken práce trvaly o něco déle, což bylo zapříčiněno scházející sekundární ochranou a tím pádem i horší manipulací s vlákny.

7.1.2 Měření MFD optických vláken

Měření probíhalo ve dvou částech. První část byla v softwaru ThorLabs Beam, který jsme používali pro měření průměru módového pole nebo-li MFD. Z výsledku, které nám program Thorlabs umožní získat, můžeme zjistit výčet parametrů optického vlákna jako např.: šířku paprsku, výkon, saturaci, vrcholovou pozici a další. Textový výstup, který nám software nabízí, obsahuje cca 40 hodnot.



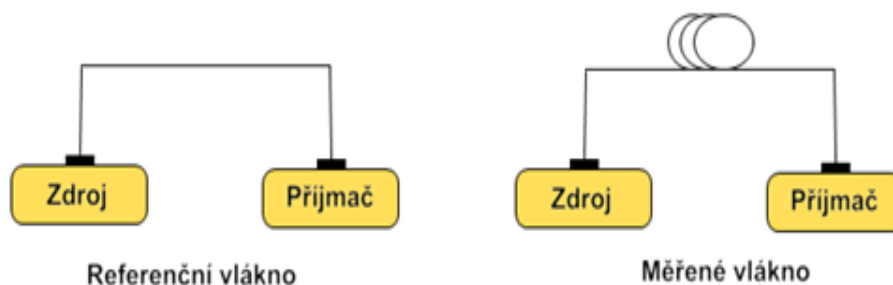
Obr. 7 Naměřené MFD singlemode vlákna z pohledu osy x



Obr. 8 3D obraz MFD signlemode vlákna

7.1.3 Měření útlumu optických vláken

Ve druhé části jsme se zabývali měřením útlumu, pro který jsme použili přímou metodou 1a. Tato metoda spočívá v použití referenčního vlákna, kterým nejprve zkalibrujeme měřící přístroje. Po zkalibrování referenční vlákno odpojíme a místo něj připojíme měřené vlákno. Samotná měření probíhala tím způsobem, že jsme ke každému vzorku vlákna naměřili deset hodnot pro obě vlnové délky tj. 1310 a 1550 nm u jednovidových a 850 a 1300 nm u mnohovidových vzorků. Měřili jsme útlum a výkon. Jako zdroj jsme použili přepínatelný laser pro všechny vlnové délky.



Obr. 9 Schéma pro měření přímou metodou 1a

7.1.4 Naměřené hodnoty před ozářením vláken

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	0,56	0,63	0,54	0,48	0,54	0,58	0,65	0,47	0,58	0,50
výkon(dBm)	4,14	4,26	4,02	4,15	4,19	4,28	4,16	4,1	4,17	4,25
výkon(mW)	2,50	2,61	2,66	2,58	2,7	2,63	2,57	2,66	2,55	2,59

Tabulka 3 SingleMode 1 (1310nm)

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	0,24	0,26	0,2	0,19	0,3	0,28	0,26	0,22	0,18	0,32
výkon(dBm)	4,54	4,48	4,56	4,6	4,57	4,49	4,52	4,57	4,61	4,53
výkon(mW)	2,84	2,91	2,75	2,7	2,69	2,89	2,91	2,85	2,79	2,9

Tabulka 4 SingleMode 1 (1550nm)

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	0,73	0,68	0,7	0,78	0,75	0,8	0,69	0,8	0,74	0,75
výkon(dBm)	3,96	4,05	4,1	4,01	3,99	3,97	3,89	4,02	4	3,9
výkon(mW)	2,49	2,55	2,46	2,45	2,52	2,6	2,41	2,58	2,47	2,53

Tabulka 5 SingleMode 2 (1310nm)

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	0,32	0,28	0,35	0,26	0,22	0,33	0,3	0,26	0,34	0,3
výkon(dBm)	4,35	4,3	4,28	4,36	4,4	4,32	4,27	4,29	4,32	4,26
výkon(mW)	2,72	2,8	2,75	2,68	2,75	2,7	2,66	2,69	2,8	2,77

Tabulka 6 SingleMode 2 (1550nm)

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	4,4	4,39	4,45	4,38	4,41	4,43	4,35	4,28	4,25	4,27
výkon(dBm)	-22,57	-22,68	-22,51	-22,48	-22,53	-22,66	-22,63	-22,5	-22,42	-22,55
výkon(mW)	5,54	5,6	5,51	5,48	5,47	5,59	5,62	5,52	5,63	5,45

Tabulka 7 MultiMode 1 (850nm)

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	21,01	21,1	20,95	21,06	21	20,93	20,99	21,08	21,02	21,09
výkon(dBm)	-21,06	-20,95	-22,12	-20,93	-21,03	-20,89	-21,13	-20,98	-21,05	-21,15
výkon(mW)	7,83	7,9	7,75	7,85	7,92	7,86	7,92	7,76	7,86	7,92

Tabulka 8 MultiMode 1 (1300nm)

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	4,08	4,01	4,14	4,12	3,98	4,08	4,1	4,05	4,13	4
výkon(dBm)	-22,36	-22,29	-22,4	-22,33	-22,48	-22,39	-22,43	-22,38	-22,25	-22,34
výkon(mW)	5,88	5,9	5,85	5,8	5,78	5,86	5,93	6,01	5,75	5,98

Tabulka 9 MultiMode 2 (850nm)

Veličina	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
útlum(dB)	20,65	20,53	20,6	20,68	20,72	20,78	20,66	20,62	20,59	20,69
výkon(dBm)	-20,68	-20,75	-20,62	-20,65	-20,59	-20,55	-20,6	-20,58	-20,55	-20,64
výkon(mW)	8,55	8,7	8,64	8,58	8,68	8,53	8,64	8,51	8,67	8,72

Tabulka 10 MultiMode 2 (1300nm)

7.1.5 Organizační problémy při druhém měření

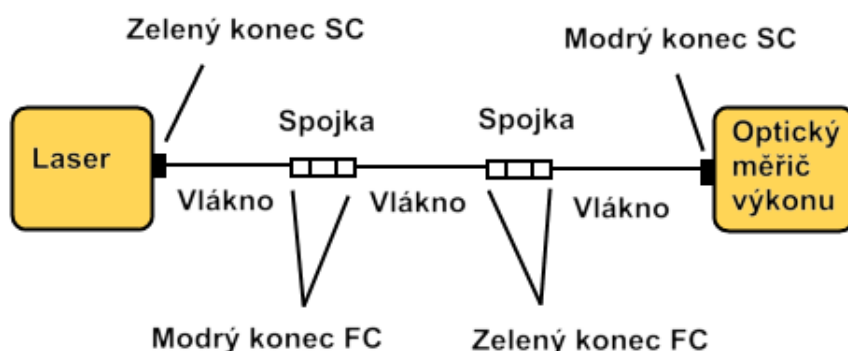
Po prvním měření optických vláken, kde jsme měřili útlum a průměr módového pole, jsme se setkali s organizačními problémy při druhých měření. Kvůli organizačním problémům ve

výzkumném ústavu v Řeži se ozářená vlákna nestihla včas doručit zpět ke zpracování dat a měření. Na doporučení garanta oboru prof. RNDr. Vladimíra Vašínka, CSc. jsem proto do této práce zahrnul také optické děliče. Podílel jsem se na měření, které probíhalo participiálně s panem Ing. Lukášem Bednárkem.

7.2 Měření optických děličů

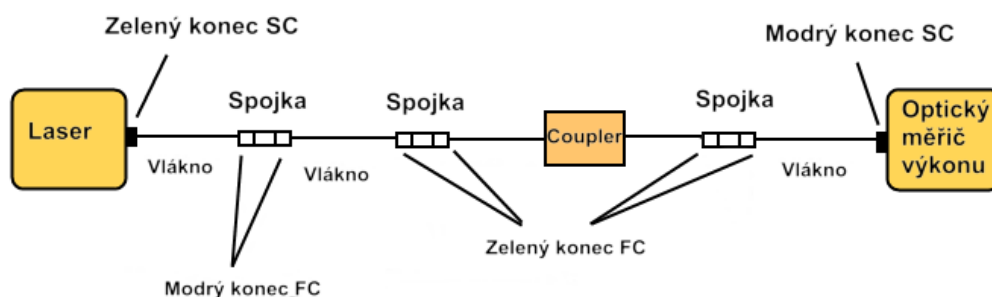
Měření optických děličů probíhalo stejně jako u optických vláken v laboratoři optoelektroniky ve školní budově na Krásném Poli.

Nejprve jsme prováděli měření celkového výkonu, který vstupuje do děliče. Proto jsme použili dvě spojky, přepínatelný laser pro obě vlnové délky 1310 a 1550 nm, optický měřič EXFO a vše jsme propojili optickým vláknem.



Obr. 10 Blokové schéma pro měření vstupního výkonu

K tomu, abychom byli schopni změřit velikosti výkonů jednotlivých výstupů, jsme museli použít ještě jednu spojku, mezi kterou jsme umístili měřený optický dělič.



Obr. 11 Blokové schéma pro měření jednotlivých vstupů

7.2.1 Naměřené hodnoty před ozářením vláken – první měření

Pro měření jsme použili optický dělič pro jednovidová vlákna s dělicím poměrem 1:4. Tedy jedná se o dělič, který původní paprsek světla rozdělí na čtyři další paprsky ve stejném poměru 25/25/25/25 (hodnoty dělicího poměru jsou uváděny v procentech).

K tomuto coupleru jsme nejprve naměřili výkon, vždy pro obě vlnové délky jak 1310 tak 1550 nm.

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	929	931	928	926	934	930	945	946	943	938
1550	971	974	969	985	985	978	969	976	973	973

Tabulka 11 Hodnoty naměřených výkonů pro vstupní signál P1

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	166	169	167	168	164	163	161	165	163	168
1550	193	195	194	193	192	191	194	193	192	190

Tabulka 12 Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 1

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	155	159	161	158	157	156	156	155	158	159
1550	190	194	190	191	189	191	192	190	193	190

Tabulka 13 Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 2

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	186	187	183	182	184	182	184	183	182	183
1550	216	208	210	211	209	211	214	211	213	214

Tabulka 14 Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 3

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	161	160	161	162	159	162	162	160	161	160
1550	183	184	183	184	181	184	183	184	182	183

Tabulka 15 Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 4

λ [nm]	P1[mW]	P2[mW]	P3[mW]	P4[mW]	P5[mW]
1310	937,75	165,65	158	183,8	160,8
1550	977,8	192,7	191,45	211,6	183,8

Tabulka 16 Průměrné hodnoty

Tabulky udávají hodnoty pro naměřený coupler. Hodnota P1 je pro vstupní signál a hodnoty P2 až P5 jsou pro výstupní signály. Jak si můžeme také všimnout, hodnoty odpovídají dělicímu poměru děliče až na výstup P4, kde je poměr o něco větší.

7.2.2 Výpočet vložného útlumu

Dalším parametrem, který jsme zjišťovali, je vložený útlum. Jak je uvedeno na webu: „Vložený útlum je mírou ztrát optického výkonu způsobený zapojením prvku do optické trasy. Vyjadřuje se v decibelech a je definován pro danou vlnovou délku záření λ .“

Vztah popisující vložený útlum obsahuje veličinu P_{in} , což je vstupní signál a veličinu P_{out} jako výstupní signál. Výsledná hodnota se uvádí v deciBellech.[17]

$$IL(\lambda) = 10 \log \left(\frac{P_{in}}{P_{out}} \right) [\text{dB}]$$

Rovnice 4 Výpočet vložného útlumu

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	7,479	7,410	7,422	7,438	7,502	7,431	7,579	7,531	7,445	7,596
1550	7,030	6,976	7,029	6,985	7,016	7,003	7,034	7,096	7,083	7,106

Tabulka 17 Hodnoty vložného útlum v dB pro výstup 1

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	7,776	7,675	7,607	7,679	7,689	7,643	7,767	7,744	7,708	7,731
1550	7,098	6,998	7,052	7,007	7,039	7,093	7,101	7,074	7,105	7,038

Tabulka 18 Hodnoty vložného útlum v dB pro výstup 2

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	6,985	6,971	7,050	7,065	7,055	7,013	7,106	7,134	7,149	7,120
1550	6,541	6,696	6,685	6,620	6,608	6,638	6,712	6,687	6,737	6,672

Tabulka 19 Hodnoty vložného útlum v dB pro výstup 3

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	7,611	7,648	7,607	7,570	7,662	7,670	7,686	7,772	7,654	7,703
1550	7,261	7,228	7,259	7,238	7,224	7,304	7,333	7,353	7,290	7,269

Tabulka 20 Hodnoty vložného útlum v dB pro výstup 4

λ [nm]	P2[dB]	P3[dB]	P4[dB]	P5[dB]
1310	7,490	7,628	7,112	7,516
1550	7,032	7,010	6,569	7,107

Tabulka 21 Průměrné hodnoty vložného útlumu

7.2.3 Výpočet dělicího poměru

Dělicí poměr optického děliče nám udává, jakým poměrem se vstupní signál rozděluje do výstupu. Tento parametr by se na první pohled mohl zdát zbytečný avšak jak jsme se sami přesvědčili u dělení výkonu, nic není ideální, a tak i když jsme použili dělič s poměrem 25% na výstup tak výsledné hodnoty se budou lišit. Dělicí poměr vypočítáme jako podíl výkonu počítaného výstupu a součtu hodnot výkonu všech výstupních výkonu.

$$D_{p2} = (P2 / (P2 + P3 + P4 + P5)) * 100$$

Rovnice 5 Výpočet dělicího poměru pro výstup 1

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	24,8554	24,9279	24,3795	24,4573	24,6734	24,4635	24,4868	24,5973	24,8908	24,7482
1550	24,4694	24,5	24,0251	24,1206	24,4055	24,4389	24,1813	24,2078	24,5922	24,5614

Tabulka 22 Dělicí poměr výstupu 1 v procentech

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	23,6994	23,9193	23,3576	23,4442	23,9477	23,8912	23,9002	23,8653	24,1630	24,0287
1550	24,3445	24,375	24,1509	24,2462	24,6558	24,5635	24,5591	24,5880	24,5922	24,4360

Tabulka 23 Dělicí poměr výstupu 2 v procentech

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	27,1676	26,8011	27,7372	27,3516	26,9956	26,7525	26,9794	26,7935	26,7831	26,3309
1550	27,2159	27,125	27,6729	27,5125	27,0337	26,9326	27,0780	27,1229	26,9761	26,8170

Tabulka 24 Dělicí poměr výstupu 3 v procentech

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	24,2774	24,3515	24,5255	24,7467	24,3831	24,892	24,6334	24,7437	24,1630	24,8920
1550	23,9700	24	24,1509	24,1206	23,9048	24,0648	24,1813	24,0811	23,839	24,1854

Tabulka 25 Dělicí poměr výstupu 4 v procentech

λ [nm]	P2	P3	P4	P5
1310	24,666	23,896	26,917	24,520
1550	24,389	24,509	27,133	23,968

Tabulka 26 Průměrná hodnota dělicího poměru jednotlivých výstupu v procentech

7.2.4 Výpočet celkových ztrát

Pomocí výpočtu celkových ztrát si můžeme spočítat, kolik výkonu se nám v signálu po průchodu děličem ztratilo. Celkové ztráty se uvádějí v jednotce výkonu deciBell.

$$Cz = 10 * \log_{10}((P2 + P3 + P4 + P5)/P1)$$

Rovnice 6 Výpočet celkových ztrát výkonu

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	1,3898	1,3773	1,4567	1,4097	1,4314	1,3415	1,4621	1,4512	1,4350	1,3892
1550	0,8936	0,8946	0,9395	0,9164	0,9088	0,8705	0,9184	0,9414	0,9065	0,8966

Tabulka 27 Celkové ztráty výkonu v dB

λ [nm]	P
1310	1,4117
1550	0,9040

Tabulka 28 Průměrné hodnoty celkových ztrát

7.2.5 Výpočet homogenity ztrát

Homogenitou ztrát rozumíme rozdíl mezi největší a nejmenší hodnotou vložného útlumu jednotlivých výstupů. Jelikož vložný útlum uvažujeme v deciBelích rovněž výsledná hodnota homogenity se uvádí v deciBelích.

$$Hz = \text{Max}(P2, P3, P4, P5) - \text{Min}(P2, P3, P4, P5)$$

Rovnice 7 Vzorec pro výpočet homogenity ztrát v MS Excel

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	0,5931	0,4940	0,7463	0,6694	0,5202	0,4912	0,5263	0,5026	0,4470	0,3973
1550	0,5515	0,5315	0,6138	0,5714	0,5342	0,4889	0,4913	0,5166	0,5368	0,4485

Tabulka 29 Homogenita ztrát v dB

λ [nm]	P
1310	0,5387
1550	0,5285

Tabulka 30 Průměrná hodnota homogenity ztrát

7.2.6 Výkon mezi jednotlivými výstupy pro směrovost

Výkon mezi jednotlivými výstupy děliče nám udává poměr mezi jednotlivými výstupy v deciBellech.

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	261	273	284	220	263	242	255	249	261	253
1550	198	151	152	143	151	139	127	136	144	145

Tabulka 31 Výkon mezi výstupem 1 a 2 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	308	291	277	276	244	335	272	267	298	293
1550	129	130	115	122	123	116	112	116	110	121

Tabulka 32 Výkon mezi výstupem 1 a 3 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	253	311	285	343	295	239	287	258	271	333
1550	101	95,7	111	109	114	109	116	98,8	113	105

Tabulka 33 Výkon mezi výstupem 1 a 4 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	326	301	297	325	322	367	294	321	340	332
1550	127	139	145	142	147	142	139	126	131	142

Tabulka 34 Výkon mezi výstupem 2 a 3 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	307	296	264	311	293	253	313	285	299	312
1550	115	109	106	123	128	126	111	105	113	122

Tabulka 35 Výkon mezi výstupem 2 a 4 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	509	552	577	539	492	518	528	397	466	566
1550	251	318	529	325	219	280	491	494	509	483

Tabulka 36 Výkon mezi výstupem 3 a 4 pro směrovost v pW

λ [nm]	1-2[pW]	1-3[pW]	1-4[pW]	2-3[pW]	2-4[pW]	3-4[pW]
1310	254,5	297,35	272,85	295	295	504,4
1550	142,35	120,9	108,24	117,55	117,55	411,65

Tabulka 37 Průměrné hodnoty výkonu mezi jednotlivými výstupy

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	65,6245	65,4293	65,2804	66,3803	65,6141	65,9482	65,7346	65,8334	65,6381	65,7779
1550	66,9633	68,1357	68,1247	68,3721	68,1445	68,4821	68,8786	68,5768	68,3374	68,3030

Tabulka 38 Směrovost výstupu 1 ku 2 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	64,9054	65,15199	65,3888	65,3954	65,9397	64,5359	65,4543	65,5303	65,0624	65,1404
1550	68,8240	68,7861	69,3361	69,0619	69,0353	69,2676	69,4245	69,2676	69,5071	69,0888

Tabulka 39 Směrovost výstupu 1 ku 3 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	65,7597	64,8633	65,2652	64,4516	65,1154	66,0023	65,2212	65,6792	65,4748	64,5846
1550	69,8867	70,1164	69,4899	69,5512	69,3653	69,538	69,2721	69,9646	69,3903	69,7048

Tabulka 40 Směrovost výstupu 1 ku 4 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	64,6587	65,0052	65,0860	64,6857	64,7351	64,1397	65,1165	64,7304	64,4897	64,5977
1550	68,8919	68,4953	68,3294	68,4026	68,2611	68,3893	68,4865	68,9085	68,7484	68,3938

Tabulka 41 Směrovost výstupu 2 ku 3 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	64,9195	65,0780	65,5976	64,8769	65,1449	65,7551	64,8445	65,2470	65,0478	64,8675
1550	69,3229	69,5512	69,6901	69,0264	68,8622	68,9085	69,4634	69,7003	69,3903	69,0530

Tabulka 42 Směrovost výstupu 2 ku 4 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	62,7237	62,3715	62,2019	62,4886	62,894	62,6430	62,5736	63,8075	63,1207	62,2809
1550	65,9332	64,9012	62,7086	64,8067	66,5299	65,4406	63,0058	62,9749	62,8539	63,0772

Tabulka 43 Směrovost výstupu 3 ku 4 v dB

λ [nm]	1-2[dB]	1-3[dB]	1-4[dB]	2-3[dB]	2-4[dB]	3-4[dB]
1310	65,726	65,251	65,242	64,724	65,138	62,711
1550	68,232	69,16	69,628	68,404	69,297	64,2232

Tabulka 44 Průměrné hodnoty směrovosti jednotlivých výstupů

7.2.7 Ozařování děličů

Děliče se odesílaly do reaktoru umístěného v Praze v ústavu jaderné fyziky. U ozářených děličů můžeme očekávat změny v jejich vlastnostech, které by měly mít za následek zhoršení přenášeného signálu.

7.2.8 Naměřené hodnoty po ozáření vláken - druhé měření

Druhé měření probíhalo obdobně jako první. U děliče jsme nejprve naměřili hodnoty výkonu a z těch vypočítali hodnoty pro ostatní veličiny. Níže jsou uvedené naměřené hodnoty výkonu pro ozáření děliče.

7.2.9 Naměřené hodnoty výkonů po ozáření

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	929	931	928	926	934	930	945	946	944	943
1550	974	972	979	969	971	973	985	984	986	976

Tabulka 45 Hodnoty výkonu pro vstup P1 v mW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	166	169	168	167	166	168	165	167	170	164
1550	193	195	194	194	193	194	195	192	193	190

Tabulka 46 Hodnoty výkonu pro výstup P2 v mW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	155	159	161	158	159	160	158	159	160	159
1550	190	194	193	193	192	190	192	193	192	193

Tabulka 47 Hodnoty výkonu pro výstup P3 v mW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	186	187	183	182	184	185	184	183	182	183
1550	216	208	210	211	212	211	210	211	209	210

Tabulka 48 Hodnoty výkonu pro výstup P4 v mW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	161	160	161	162	160	159	161	158	162	160
1550	183	184	184	183	184	181	182	181	184	183

Tabulka 49 Hodnoty výkonu pro výstup P5 v mW

λ [nm]	P1[mW]	P2[mW]	P3[mW]	P4[mW]	P5[mW]
1310	937,75	165,65	158	183,8	160,8
1550	977,8	192,7	191,45	211,6	183,8

Tabulka 50 Průměrné hodnoty naměřených výkonů

7.2.10 Hodnoty vložného útlumu po ozáření

Po naměření všech výkonů jsme opět z těchto hodnot vypočítali hodnoty vložného útlumu a jeho poměru.

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	7,4790	7,4106	7,4223	7,4389	7,5023	7,4317	7,5794	7,5317	7,4452	7,5966
1550	7,0300	6,9763	7,0298	6,9852	7,0166	7,0031	7,0340	7,0969	7,0831	7,1069

Tabulka 51 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P2 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	7,7768	7,6755	7,6072	7,6795	7,6894	7,6436	7,76774	7,7449	7,7085	7,7311
1550	7,0980	6,9986	7,0522	7,0076	7,0391	7,0935	7,1013	7,0743	7,1057	7,0389

Tabulka 52 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P3 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	6,9850	6,971	7,0509	7,0653	7,0552	7,0131	7,1061	7,1344	7,1490	7,1206
1550	6,5410	6,696	6,6856	6,6204	6,6088	6,6383	6,7121	6,6871	6,7373	6,6723

Tabulka 53 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P4 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	7,6118	7,6482	7,6072	7,5709	7,6622	7,6708	7,6860	7,7723	7,6545	7,7039
1550	7,2610	7,2284	7,2596	7,2387	7,2240	7,3043	7,3336	7,3531	7,2905	7,2699

Tabulka 54 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P5 v dB

λ [nm]	P2[dB]	P3[dB]	P4[dB]	P5[dB]
1310	7,7944	7,7079	7,0658	7,6583
1550	7,0400	7,0667	6,6609	7,2772

Tabulka 55 Průměrné hodnoty vložných útlumů v dB

7.2.11 Hodnoty dělicího poměru po ozáření

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	24,8502	25,0370	24,9628	24,9626	24,8131	25	24,7005	25,037	25,2222	24,6246
1550	24,6803	24,9679	24,8399	24,8399	24,7119	25	25,0320	24,710	24,8071	24,4845

Tabulka 56 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P2 v procentech

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	23,2035	23,5555	23,9227	23,6173	23,7668	23,8095	23,6526	23,8380	23,7388	23,8738
1550	24,2966	24,8399	24,7119	24,7119	24,5838	24,4845	24,6469	24,8391	24,6786	24,8711

Tabulka 57 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P3 v procentech

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	27,8443	27,7037	27,1916	27,2047	27,5037	27,5297	27,5449	27,4362	27,0029	27,4774
1550	27,6214	26,6325	26,8886	27,0166	27,1446	27,1907	26,9576	27,1557	26,8637	27,0618

Tabulka 58 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P4 v procentech

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	24,1017	23,7037	23,9227	24,2152	23,9162	23,6607	24,1017	23,6881	24,0356	24,0240
1550	23,4015	23,5595	23,5595	23,4314	23,5595	23,3247	23,36328	23,2947	23,6503	23,5824

Tabulka 59 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P5 v procentech

λ [nm]	P2	P3	P4	P5
1310	24,7871	23,6437	27,5051	24,0633
1550	24,7384	24,5780	27,1647	23,5188

Tabulka 60 Průměrné hodnoty dělicích poměrů jednotlivých výstupů v procentech

7.2.12 Hodnoty celkových ztrát po ozáření

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	1,4323	1,3964	1,3953	1,4118	1,4492	1,4111	1,5065	1,5176	1,4631	1,5103
1550	0,9535	0,9501	0,9813	0,9367	0,9456	0,9825	1,0189	1,0257	1,0289	0,9958

Tabulka 61 Hodnoty celkových ztrát v dB

λ [nm]	P
1310	1,4494
1550	0,9819

Tabulka 62 Průměrné hodnoty celkových ztrát v dB

7.2.13 Hodnoty homogenity ztrát po ozáření

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	0,7918	0,7044	0,5562	0,6141	0,6342	0,6577	0,6616	0,6379	0,5595	0,6105
1550	0,7200	0,5324	0,5740	0,6183	0,6151	0,6660	0,6214	0,6660	0,5532	0,5976

Tabulka 63 Hodnoty celkových ztrát v dB

λ [nm]	P
1310	0,6428
1550	0,6164

Tabulka 64 Průměrné hodnoty celkových ztrát v dB

7.2.14 Hodnoty směrovosti pro jednotlivé výstupy po ozáření

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	182	217	220	193	202	197	201	188	210	184
1550	151	172	169	146	147	155	152	155	156	146

Tabulka 65 Hodnoty výkonu mezi vstupem 1 a 2 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	170	166	179	158	169	164	163	173	168	181
1550	113	115	117	116	120	119	122	116	111	115

Tabulka 66 Hodnoty výkonu mezi vstupem 1 a 3 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	148	153	134	144	142	140	158	157	151	153
1550	100	101	104	98,1	100	103	96,9	100	105	102

Tabulka 67 Hodnoty výkonu mezi vstupem 1 a 4 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	182	184	168	177	174	179	181	189	182	184
1550	126	127	120	122	123	130	126	129	128	125

Tabulka 68 Hodnoty výkonu mezi vstupem 2 a 3 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	128	113	118	129	115	105	128	111	116	103
1550	75,5	82,7	85,6	86,8	84,4	82,7	88	77,9	80,3	85,6

Tabulka 69 Hodnoty výkonu mezi vstupem 2 a 4 pro směrovost v pW

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	242	315	324	376	339	313	288	162	128	220
1550	211	217	187	331	264	200	211	186	181	213

Tabulka 70 Hodnoty výkonu mezi vstupem 3 a 4 pro směrovost v pW

λ [nm]	1-2[pW]	1-3[pW]	1-4[pW]	2-3[pW]	2-4[pW]	3-4[pW]
1310	197,3	177,95	147,5	176,45	117,15	229,65
1550	153,4	120,05	99,03	125,25	84,08	214,55

Tabulka 71 Průměrné hodnoty výkonů mezi jednotlivými výstupy

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	67,0794	66,3248	66,2512	66,8105	66,6499	66,7401	66,7223	67,0173	66,5275	67,0969
1550	68,0958	67,5213	67,6289	68,2197	68,1990	67,9778	68,1159	68,0266	68,00752	68,2509

Tabulka 72 Hodnoty směrovosti výstupu 1 ku výstupu 3 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	67,3756	67,4884	67,1469	67,6795	67,4246	67,5363	67,6324	67,3784	67,4966	67,1683
1550	69,3548	69,2696	69,2259	69,2186	69,0803	69,1256	69,0707	69,2853	69,4855	69,2875

Tabulka 73 Hodnoty směrovosti výstupu 1 ku výstupu 4 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	67,9775	67,8425	68,4044	68,0824	68,1805	68,2235	67,7677	67,79995	67,9599	67,8982
1550	69,8855	69,8334	69,7374	69,9465	69,8721	69,7527	70,0711	69,9299	69,7268	69,8084

Tabulka 74 Hodnoty směrovosti výstupu 2 ku výstupu 3 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	67,0794	68,8818	67,0794	68,8818	67,0794	68,8818	67,0794	68,8818	67,0794	68,8818
1550	67,0413	68,8386	67,0413	68,8386	67,0413	68,8386	67,0413	68,8386	67,0413	68,8386

Tabulka 75 Hodnoty směrovosti výstupu 2 ku výstupu 4 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	68,6080	69,1587	68,9566	68,5602	69,0964	69,4729	68,6822	69,3056	69,1051	69,6167
1550	71,1061	70,7016	70,5830	70,4780	70,6087	70,7060	70,4895	71,0145	70,8916	70,5697

Tabulka 76 Hodnoty směrovosti výstupu 2 ku výstupu 4 v dB

λ [nm]	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1310	65,8420	64,7063	64,5700	63,9142	64,4014	64,7293	65,1603	67,6637	68,6776	66,3208
1550	66,6427	66,5120	67,1894	64,6649	65,6561	66,8708	66,6915	67,2348	67,3619	66,6107

Tabulka 77 Hodnoty směrovosti výstupu 3 ku výstupu 4 v dB

λ [nm]	1-2[dB]	1-3[dB]	1-4[dB]	2-3[dB]	2-4[dB]	3-4[dB]
1310	66,7220	67,4327	68,0137	67,1601	69,0562	65,5986
1550	68,0043	69,2404	69,8564	68,9097	70,7149	66,5435

Tabulka 78 Průměrné hodnoty výkonů mezi jednotlivými výstupy

8 VYHODNOCENÍ VÝSLEDKŮ

Celá tato bakalářská práce se zabývá optoelektronikou a vlivem radioaktivního záření na optická vlákna a optické děliče. Dle mnou nastudované teorie by gama záření na tyto optické prvky mělo působit negativně a to způsobit zhoršení jejich přenosových vlastností. Především by měla radioaktivita negativně působit na jejich strukturu a tím pádem bychom měli vidět nárůst hodnot útlumu. Hodnoty by měly být větší zhruba o několik setin až desetin deciBell. Dále by měla působit negativně i na další jejich vlastnosti. K ověření této teorie nyní musím porovnat hodnoty, které jsem získal v praktické části této práce.

8.1 Vložný útlum

λ [nm]	P2[dB]	P3[dB]	P4[dB]	P5[dB]
1310	7,496	7,644	7,106	7,516
1550	7,043	7,025	6,571	7,097

Tabulka 79 Průměrné hodnoty naměřených útlumů pro jednotlivé výstupy děliče před ozářením

λ [nm]	P2[dB]	P3[dB]	P4[dB]	P5[dB]
1310	7,483	7,707	7,065	7,658
1550	7,036	7,066	6,659	7,276

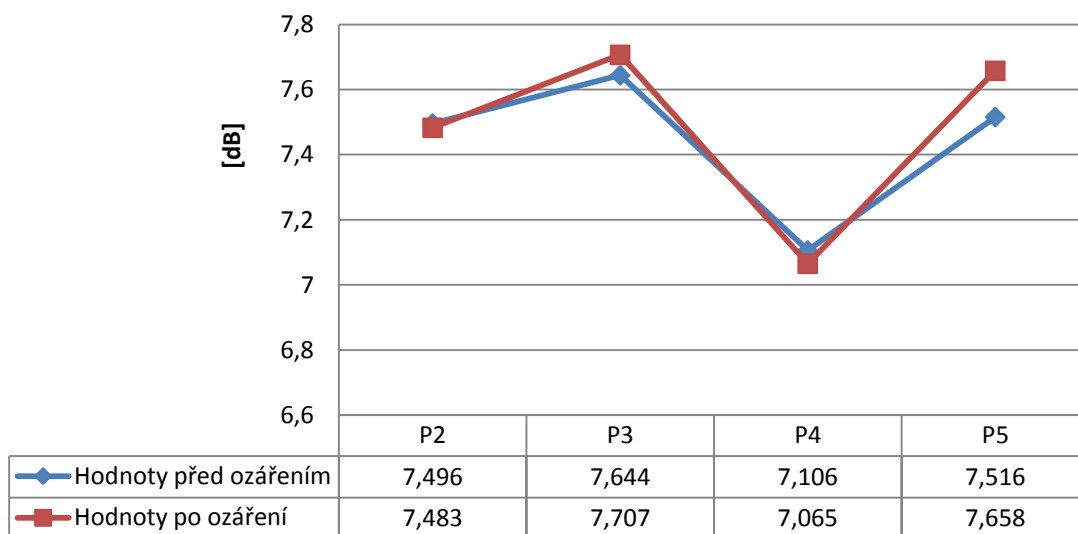
Tabulka 80 Průměrné hodnoty naměřených útlumů pro jednotlivé výstupy děliče po ozáření

λ [nm]	P2[dB]	P3[dB]	P4[dB]	P5[dB]
1310	-0,013	+0,063	-0,041	+0,142
1550	-0,007	+0,041	+0,088	+0,179

Tabulka 81 Rozdíl útlumu po a před ozáření děliče

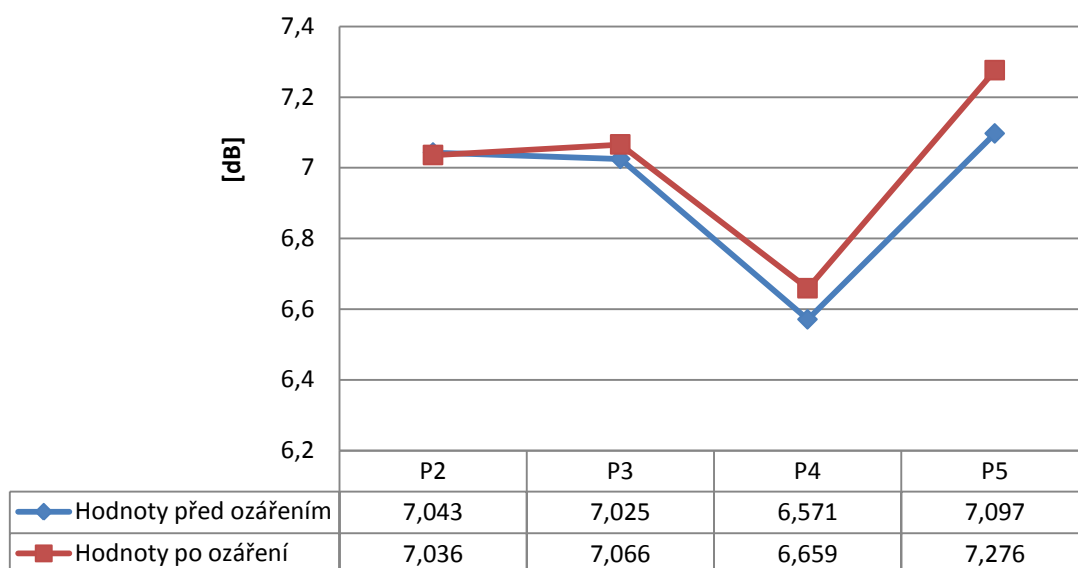
Měření potvrdilo předpoklad a hodnoty útlumů u některých výstupů skutečně vzrostly až o desetiny deciBell. Z tabulky můžeme vyčíst, že ozáření mělo větší vliv na útlum paprsku o vlnové délce 1550 nm, největší vliv u výstupu číslo 4 (P5). Pro lepší přehlednost a znázornění se můžeme na změny útlumů jednotlivých výstupů podívat v níže uvedeném grafu.

Graf útlumu jednotlivých výstupů před a po ozáření děliče pro vlnovou délku 1310nm



Obr. 12 Graf útlumu před a po ozáření optického děliče pro vlnovou délku 1310nm

Graf útlumu jednotlivých výstupů před a po ozáření děliče pro vlnovou délku 1550nm



Obr. 13 Graf útlumu před a po ozáření optického děliče pro vlnovou délku 1550nm

8.2 Celkové ztráty

Poškození přenosových vlastností optického děliče gama zářením můžeme také určit pomocí celkových ztrát v přenášeném infračerveném paprsku. Jelikož radiace narušuje strukturu děliče, měly by celkové ztráty s dávkou ozáření narůstat. Hodnoty celkových ztrát před a po ozáření můžeme porovnat z uvedených tabulek. První dvě tabulky udávají velikosti celkových ztrát před a po ozáření a třetí tabulka obsahuje rozdíl těchto hodnot.

λ [nm]	P[dB]
1310	1,4117
1550	0,9040

Tabulka 82 Průměrné hodnoty celkových ztrát před ozářením

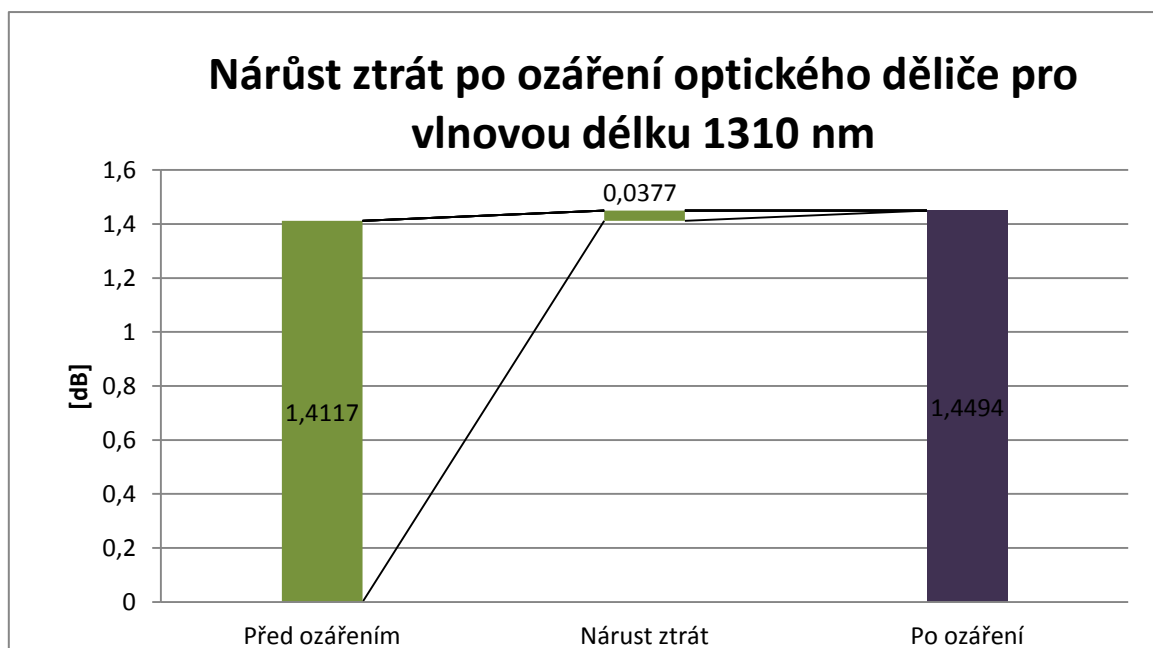
λ [nm]	P[dB]
1310	1,4494
1550	0,9819

Tabulka 83 Průměrné hodnoty celkových ztrát po ozáření

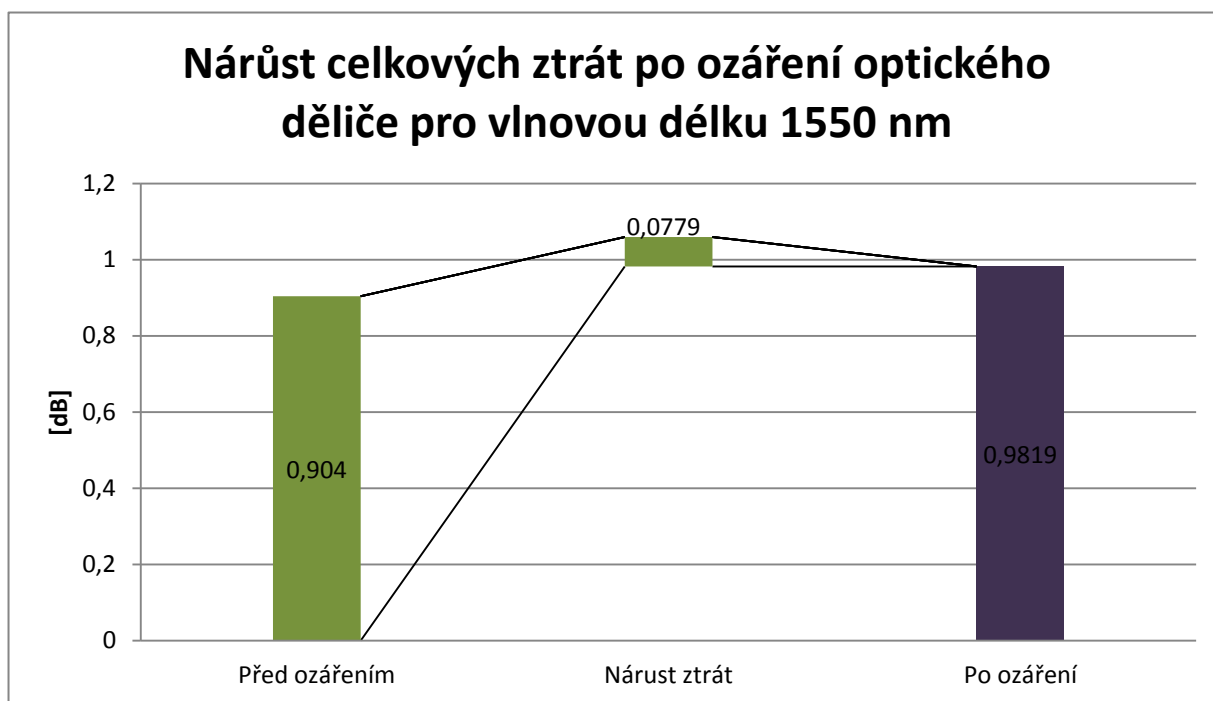
λ [nm]	P[dB]
1310	+0,0377
1550	+0,0779

Tabulka 84 Rozdíl celkových ztrát před a po ozáření děliče

Radioaktivní vlivy se více projevíly opět u vlnové délky 1550 nm, kde jsme zaznamenali navýšení ztrát o 0,0779 deciBell. Lépe na tom byl světelný paprsek o vlnové délce 1310 nm, kde byly ztráty navýšeny od své původní hodnoty o 0,0377 deciBell. Nárůst ztrát je zobrazen v grafu.



Obr. 14 Graf nárůstu celkových ztrát po ozáření pro vlnovou délku 1310 nm



Obr. 15 Graf nárůstu celkových ztrát po ozáření pro vlnovou délku 1550nm

8.3 Homogenita ztrát

Homogenita ztrát nám určuje rozdíl mezi největším a nejmenším vypočteným útlumem jednotlivých výstupů. Jinými slovy, z homogenity ztrát můžeme určit, jak moc velké rozdíly ve ztrátách výstupy mají.

λ [nm]	P[dB]
1310	0,5387
1550	0,5285

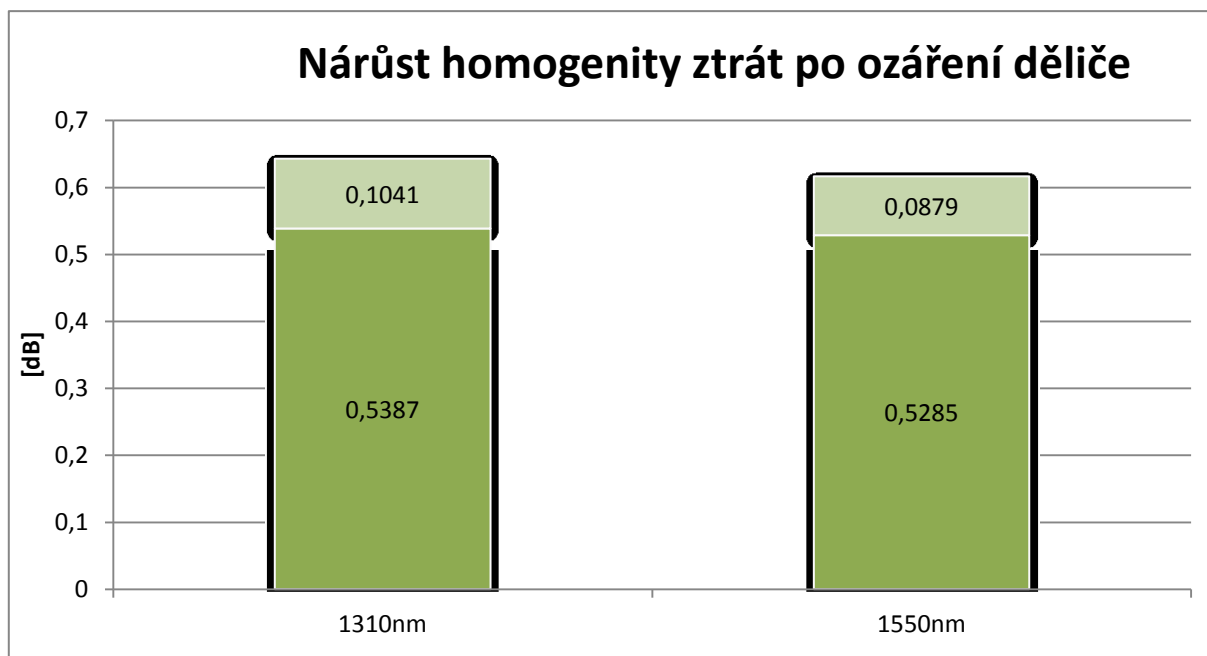
Tabulka 85 Průměrné hodnoty homogenity ztrát před ozářením

λ [nm]	P[dB]
1310	0,6428
1550	0,6164

Tabulka 86 Průměrné hodnoty homogenity ztrát po ozáření

λ [nm]	P[dB]
1310	+0,1041
1550	+0,0879

Tabulka 87 Rozdíl hodnot po a před ozáření



Obr. 16 Nárůst homogenity ztrát pro obě vlnové délky po ozáření děliče

8.4 Hodnoty výkonů jednotlivých výstupů

I když má každý dělič od výroby určený svůj dělicí poměr, jeho výstupní hodnoty neodpovídají zcela přesně této jeho specifikaci. V této práci pracujeme s děličem s dělicím poměrem 1:4 25/25/25/25 tzn. signál, který přivedeme na vstup děliče se dělí do čtyř výstupů s poměrem výstupního výkonu 25% pro každý vstup. V následujících tabulkách jsou poměry hodnoty výkonů mezi jednotlivými výstupy.

λ [nm]	1-2[pW]	1-3[pW]	1-4[pW]	2-3[pW]	2-4[pW]	3-4[pW]
1310	254,5	297,35	272,85	295	295	504,4
1550	142,35	120,9	108,24	117,55	117,55	411,65

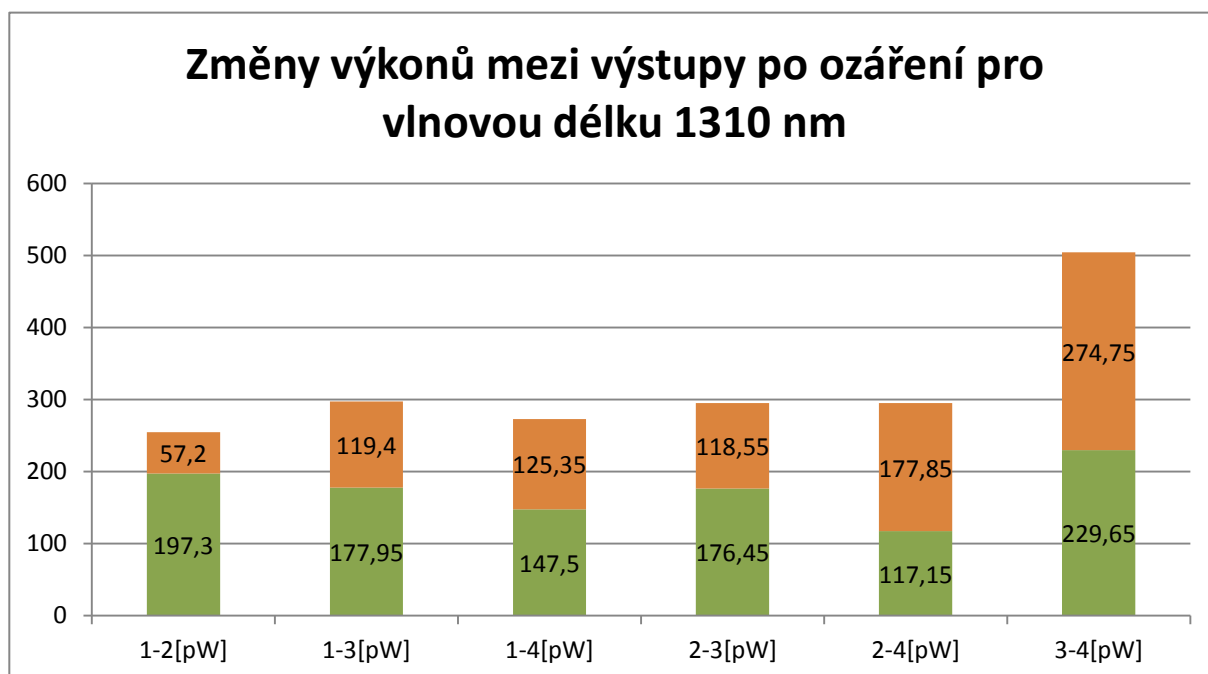
Tabulka 88 Hodnoty výkonu mezi jednotlivými výstupy před ozáření

λ [nm]	1-2[pW]	1-3[pW]	1-4[pW]	2-3[pW]	2-4[pW]	3-4[pW]
1310	197,3	177,95	147,5	176,45	117,15	229,65
1550	153,4	120,05	99,03	125,25	84,08	214,55

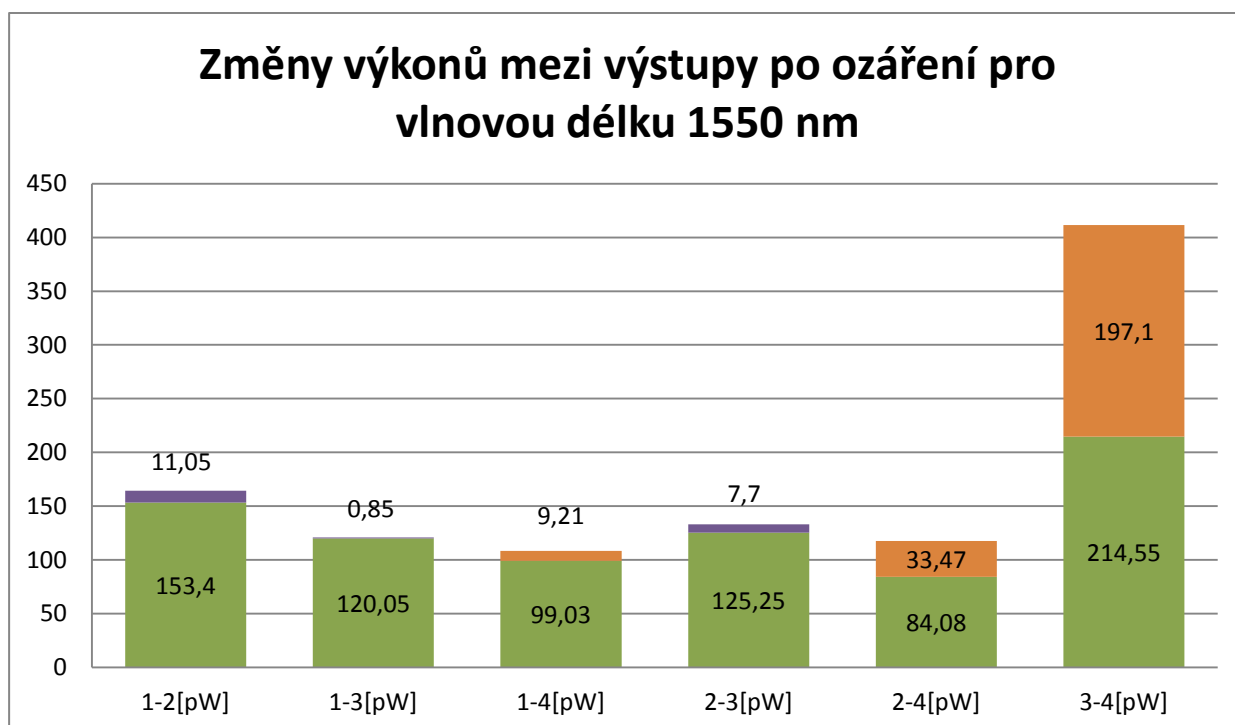
Tabulka 89 Hodnoty výkonu mezi jednotlivými výstupy po ozáření

λ [nm]	1-2[pW]	1-3[pW]	1-4[pW]	2-3[pW]	2-4[pW]	3-4[pW]
1310	-57,2	-119,4	-125,35	-118,55	-177,85	-274,75
1550	+11,05	+0,85	-9,21	+7,7	-33,47	-197,1

Tabulka 90 Rozdíl hodnot po a před ozáření



Obr. 17 Graf změn výkonu po ozáření pro vlnovou délku 1310 nm



Obr. 18 Graf změn výkonu po ozáření pro vlnovou délku 1550 nm

Z grafu je na první pohled patrné, že ozáření velmi ovlivnilo hodnoty pro vlnovou délku 1310 nm, kde u směrovosti mezi výstupem 3 a 4 byl zaznamenán takřka poloviční pokles výkonu. Naproti tomu vlnová délka 1550 nm (kromě výše uvedeného výstupu), na tom byla lépe.

8.5 Hodnoty směrovosti mezi jednotlivými výstupy

Směrovost mezi jednotlivými výstupy udává poměr výkonu, který se mezi výstupy dělí. Tuto hodnotu udává pro každé dva výstupy mezi sebou a můžeme podle něj určit, jak dělič dodržuje svůj dělicí poměr.

λ [nm]	1-2[dB]	1-3[dB]	1-4[dB]	2-3[dB]	2-4[dB]	3-4[dB]
1310	65,726	65,251	65,242	64,724	65,138	62,711
1550	68,232	69,16	69,628	68,404	69,297	64,2232

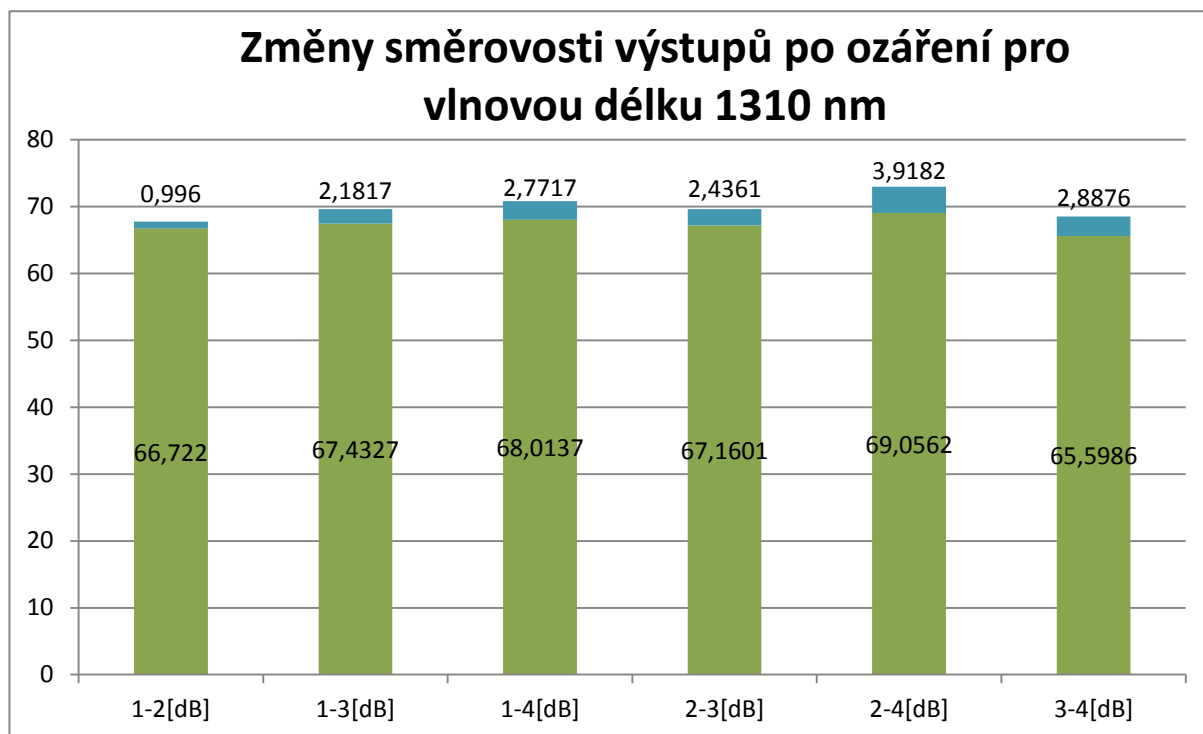
Tabulka 91 Hodnoty směrovosti mezi výstupy před ozářením

λ [nm]	1-2[dB]	1-3[dB]	1-4[dB]	2-3[dB]	2-4[dB]	3-4[dB]
1310	66,7220	67,4327	68,0137	67,1601	69,0562	65,5986
1550	68,0043	69,2404	69,8564	68,9097	70,7149	66,5435

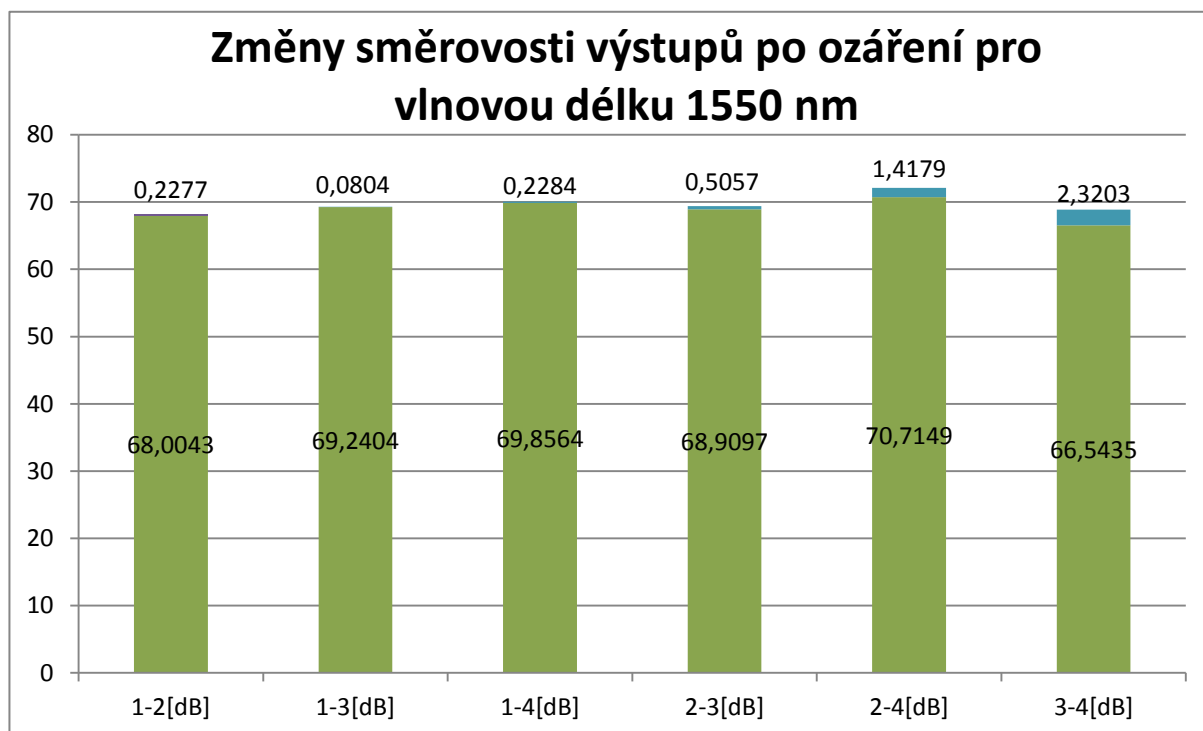
Tabulka 92 Hodnoty směrovosti mezi výstupy po ozáření

λ [nm]	1-2[dB]	1-3[dB]	1-4[dB]	2-3[dB]	2-4[dB]	3-4[dB]
1310	+0,996	+2,1817	+2,7717	+2,4361	+3,9182	+2,8876
1550	-0,2277	+0,0804	+0,2284	+0,5057	+1,4179	+2,3203

Tabulka 93 Rozdíl hodnot po a před ozáření



Obr. 19 Změny směrovosti výstupů po ozáření pro vlnovou délku 1310 nm



Obr. 20 Změny směrovosti výstupů po ozáření pro vlnovou délku 1550 nm

ZÁVĚR

Hlavním cílem této práce bylo ověřit vliv gama záření na optická vlákna a optické děliče. Za tímto účelem bylo provedeno měření v laboratoři optoelektroniky Fakulty elektrotechniky a informatiky na Krásném poli a ozařování v reaktoru ústavu jaderné fyziky v Řeži v Praze.

Teoretická část práce se zabývá vlastnostmi těchto pasivních optických prvků, jejich přednostmi, handicapu a praktickým využitím.

V praktické části pak popisují samotný postup měření a jeho provedení po jednotlivých krocích. Uvádím výsledky naměřených hodnot a v případě jejich odchylky od teoretických předpokladů je vždy uvedeno její odůvodnění.

Z vyhodnocení výsledků měření, které jsem získal během zpracovávání praktické části v laboratořích, vyplývá, že i když radioaktivní záření může mít v některých oblastech praktické využití (hubení bakterií, sterilizace lékařských nástrojů), tak na optické prvky působí velmi negativně.

Ve výsledcích měření optických děličů jsem po první dávce radioaktivního záření zaznamenal zvýšený nárůst vložného útlumu. Ten se u výstupu 4 po ozáření optického děliče zvýšil téměř o 0,2 dB a došlo také k nárůstu celkových ztrát, které při vlnové délce 1550 nm vzrostly o téměř 0,08 dB. Otázkou však zůstává, jaký vliv by na výše uvedené hodnoty měly další dávky ozařování a jakou charakteristiku bychom mohli vidět u naměřených hodnot útlumu při dalších dávkách radiace. Zda by se útlum a celkové ztráty s každou dávkou radiace zvětšovaly o konstantní hodnotu či by dosáhly určité maximální úrovně a poté se zvyšovaly jen minimálně. V této oblasti by bylo vhodné provést další měření a srovnání závislosti naměřených hodnot na počtu dávek radiace.

V práci se mi tedy podařilo ověřit a vyhodnotit vliv gama záření na dané pasivní optické prvky. Z poznatků, které jsem zpracoval v teoretické části, vyplývá, že s radioaktivním zářením, které působí na optické pasivní prvky ve větší míře, se setkáváme pouze v extrémních případech, jako např.: vojenské základny, prostředí jaderného reaktoru a další. Avšak právě pro ně je jsou podobná měření nezbytná a bez nich bychom nevěděli, co přesně můžeme od působení radiace na tyto prvky očekávat. Útlum i celkové ztráty totiž patří k důležitým parametrům u přenosových vlastností optických děličů a mají za následek zhoršení přenosu a zkracují trasu pro přenos signálu.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [1] Optické vlákno. In: *Panwiki* [online]. 16.4.2013 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: http://panwiki.panska.cz/index.php/Optick%C3%A9_vl%C3%A1kno
- [2] MAZANEC, Michal. *Optické vlákna* [online]. 2012 [cit. 2013-11-26]. Dostupný z WWW: <http://www.crr.vutbr.cz/system/files/prezentace_06_1206_1.pdf>.
- [3] OPTE.IMATTE.CZ: Optoelektronika v telekomunikacích a senzORIZACE. FAJKUS, Marcel. *Základní vlastnosti optických vláken* [online]. 2011 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: <http://opte.imatte.cz/teorie/opticke-vlakna/6-zaklady-vlastnosti-optickych-vlaken>
- [4] Jednovidové optické vlákno. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Jednovidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno
- [5] Vícevidová optická vlákna: Se skokovým indexem lomu. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADcevidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno#Gradientn%C3%AD_vl%C3%A1kno
- [6] Vícevidová optická vlákna: Gradientní vlákno. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-11-30]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/V%C3%ADcevidov%C3%A9_optick%C3%A9_vl%C3%A1kno#Gradientn%C3%AD_vl%C3%A1kno
- [7] HABER, J.B., E. MIES, J.R. SIMPSON a S. WONG. Assessment of Radiation-Induced Loss for AT&T Fiber-optic Transmission Systems in the Terrestrial Environment. *Journal of Lightwave Technology* [online]. 1988, č. 6, s. 5 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?arnumber=00003982>
- [8] ALTERNATIVO. *Couplery: Výkonové děliče* [online]. 2013 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: http://www.alternativo.cz/opticke-site-couplery-vykonove-delice_c1742.html
- [9] RLC. *WDM systems: Couplery* [online]. 2012 [cit. 2014-04-29]. Dostupné z: <http://www.rlc.cz/Produkty/WDM-SYSTEMS/Couplery/>
- [10] Záření gama. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001- [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: http://cs.wikipedia.org/wiki/Z%C3%A1%C5%99en%C3%AD_gama
- [11] *Nejenergetičtější vesmírné částice na MFF UK*. Praha, 2010. Dostupné z: http://www-ucjf.troja.mff.cuni.cz/~nedbal/documents/2010-12-02_dod_ucjf-hess-a-auger_jd.pdf
- [12] Optical fiber amplifiers for telecommunication systems. *IEEE Communications Magazine*. 1996, č. 1, s. 7. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org/stamp/stamp.jsp?tp=&arnumber=533926>
- [13] MLEJNEK, Zbyněk. *Optické zesilovače*. Brno, 2008. Dostupné z: https://dspace.vutbr.cz/bitstream/handle/11012/3632/Bakalarska_prace_77660.pdf?sequence=1. Bakalářská práce. Vysoké Učení Technické v Brně. Vedoucí práce DOC.ING. Miloslav Filka, CSC.
- [14] *Optické zesilovače* [online]. 2010 [cit. 2013-11-26]. Dostupné z: <http://www.safibra.cz/opticke-zesilovace>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

(λ)	Lambda
dB	decibel – jednotka pro měření výkonu
dBm	Decibel nad miliwattem – jednotka pro měření útlumu
SM	Single Mode vlákno
MM	Multi Mode vlákno
MFD	Průměr módového pole
VFL	Zdroje sloužící ke kontrole optických tras
AT&T	Standard optických vláken
EDFA	Optovláknové zesilovače dopované erbiem
PDFA	Optovláknové zesilovače dopované prazeodymem
TDFA	Optovláknové zesilovače dopované thuliem
YDFA	Optovláknové zesilovače dopované Yterbiem
PMD	Polarizační vidová disperze
L	Délka vlákna
km	Jednotka délky kilometr
ΔT	Časový rozdíl mezi prvním a posledním paprskem u PMD
ps	pikosekunda
$D(\lambda)$	Chromatická disperze, jež je funkcí vlnové délky
$dT_{G(\lambda)}$	Změna skupinového zpoždění signálu
$d(\lambda)$	Vlnová délka
nm	Nanometr
NA	Numerická apertura
n_1, n_2	Index lomu jádra a pláště
dB/km	decibel na uražený kilometr - jednotka útlumu

LDR	Low Dose Rate test – metoda pro ozařování vláken
rad/h	rad na hodinu - jednotka pro ozařování
mdB/km/rad	milideciBell na kilometr na rad – jednotka
^{238}U	Uranium
^{40}K	Potassium
^{232}Th	Thorium
LAN	Local Area Network – místní síť
mW	miliWatt – jednotka výkonu
Th	Thulium
Yb	Yterbium
Er	Erbium
IL	Insert Loss – vložené ztráty
mrad	miliradián

SEZNAM GRAFŮ

Obr. 1 Průřez optickým vláknem	2
Obr. 2 Jednovidové optické vlákno.....	6
Obr. 3 Mnohavidové optické vlákno.....	7
Obr. 4 Dělení paprsků světla optickým děličem	8
Obr. 5 Blokové schéma EDFA zesilovače	16
Obr. 6 Blokové schéma Ramanovského zesilovače.....	17
Obr. 7 Naměřené MFD singlemode vlákna z pohledu osy x	19
Obr. 8 3D obraz MFD singlemode vlákna	20
Obr. 9 Schéma pro měření přímou metodou 1a	20
Obr. 10 Blokové schéma pro měření vstupního výkonu.....	22
Obr. 11 Blokové schéma pro měření jednotlivých vstupů	22
Obr. 12 Graf útlumu před a po ozáření optického děliče pro vlnovou délku 1310nm.....	35
Obr. 13 Graf útlumu před a po ozáření optického děliče pro vlnovou délku 1550nm.....	35
Obr. 14 Graf nárůstu celkových ztrát po ozáření pro vlnovou délku 1310 nm.....	37
Obr. 15 Graf nárůstu celkových ztrát po ozáření pro vlnovou délku 1550nm.....	37
Obr. 16 Nárůst homogenity ztrát pro obě vlnové délky po ozáření děliče.....	38
Obr. 17 Graf změn výkonu po ozáření pro vlnovou délku 1310 nm	39
Obr. 18 Graf změn výkonu po ozáření pro vlnovou délku 1550 nm	40
Obr. 19 Změny směrovosti výstupů po ozáření pro vlnovou délku 1310 nm.....	41
Obr. 20 Změny směrovosti výstupů po ozáření pro vlnovou délku 1550 nm.....	41

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1	Radiační citlivost při LDR testu AT&T jednovířových vláken a mnohavířových vláken standardu 62,5/125 μm (mdB/km/rad)	11
Tabulka 2	Hodnota ztrát vyvolaných radiačním zářením na dálkovém vedení jednovířových optických vláken v pozemním prostředí za dvacetiletou periodu.	12
Tabulka 4	SingleMode 1 (1310nm)	20
Tabulka 5	SingleMode 1 (1550nm)	21
Tabulka 6	SingleMode 2 (1310nm)	21
Tabulka 7	SingleMode 2 (1550nm)	21
Tabulka 8	MultiMode 1 (850nm).....	21
Tabulka 9	MultiMode 1 (1300nm).....	21
Tabulka 10	MultiMode 2 (850nm).....	21
Tabulka 11	MultiMode 2 (1300nm).....	21
Tabulka 12	Hodnoty naměřených výkonů pro vstupní signál P1	23
Tabulka 13	Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 1	23
Tabulka 14	Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 2.....	23
Tabulka 15	Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 3.....	23
Tabulka 16	Hodnoty naměřených výkonů pro výstupní signál 4.....	23
Tabulka 17	Průměrné hodnoty	23
Tabulka 18	Hodnoty vložného útlumu v dB pro výstup 1	24
Tabulka 19	Hodnoty vložného útlumu v dB pro výstup 2	24
Tabulka 20	Hodnoty vložného útlumu v dB pro výstup 3	24
Tabulka 21	Hodnoty vložného útlumu v dB pro výstup 4	24
Tabulka 22	Průměrné hodnoty vložného útlumu	25
Tabulka 28	Dělicí poměr výstupu 1 v procentech.....	25
Tabulka 29	Dělicí poměr výstupu 2 v procentech.....	25
Tabulka 30	Dělicí poměr výstupu 3 v procentech.....	25
Tabulka 31	Dělicí poměr výstupu 4 v procentech.....	25
Tabulka 32	Průměrná hodnota dělicího poměru jednotlivých výstupů v procentech	26
Tabulka 33	Celkové ztráty výkonu v dB.....	26
Tabulka 34	Průměrné hodnoty celkových ztrát.....	26
Tabulka 35	Homogenita ztrát v dB	26
Tabulka 36	Průměrná hodnota homogenity ztrát	26

Tabulka 37 Výkon mezi výstupem 1 a 2 pro směrovost v pW	27
Tabulka 38 Výkon mezi výstupem 1 a 3 pro směrovost v pW	27
Tabulka 39 Výkon mezi výstupem 1 a 4 pro směrovost v pW	27
Tabulka 40 Výkon mezi výstupem 2 a 3 pro směrovost v pW	27
Tabulka 41 Výkon mezi výstupem 2 a 4 pro směrovost v pW	27
Tabulka 42 Výkon mezi výstupem 3 a 4 pro směrovost v pW	27
Tabulka 43 Průměrné hodnoty výkonu mezi jednotlivými výstupy	27
Tabulka 44 Směrovost výstupu 1 ku 2 v dB	28
Tabulka 45 Směrovost výstupu 1 ku 3 v dB	28
Tabulka 46 Směrovost výstupu 1 ku 4 v dB	28
Tabulka 47 Směrovost výstupu 2 ku 3 v dB	28
Tabulka 48 Směrovost výstupu 2 ku 4 v dB	28
Tabulka 49 Směrovost výstupu 3 ku 4 v dB	28
Tabulka 50 Průměrné hodnoty směrovosti jednotlivých výstupů	28
Tabulka 51 Hodnoty výkonu pro vstup P1 v mW	29
Tabulka 52 Hodnoty výkonu pro výstup P2 v mW	29
Tabulka 53 Hodnoty výkonu pro výstup P3 v mW	29
Tabulka 54 Hodnoty výkonu pro výstup P4 v mW	29
Tabulka 55 Hodnoty výkonu pro výstup P5 v mW	29
Tabulka 56 Průměrné hodnoty naměřených výkonů	29
Tabulka 57 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P2 v dB	30
Tabulka 58 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P3 v dB	30
Tabulka 59 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P4 v dB	30
Tabulka 60 Vypočtené hodnoty vložného útlumu pro výstup P5 v dB	30
Tabulka 61 Průměrné hodnoty vložných útlumů v dB	30
Tabulka 62 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P2 v procentech	30
Tabulka 63 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P3 v procentech	31
Tabulka 64 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P4 v procentech	31
Tabulka 65 Vypočtené hodnoty dělicího poměru pro výstup P5 v procentech	31
Tabulka 66 Průměrné hodnoty dělicích poměrů jednotlivých výstupů v procentech	31
Tabulka 67 Hodnoty celkových ztrát v dB	31
Tabulka 68 Průměrné hodnoty celkových ztrát v dB	31
Tabulka 69 Hodnoty celkových ztrát v dB	31
Tabulka 70 Průměrné hodnoty celkových ztrát v dB	32

Tabulka 71 Hodnoty výkonu mezi vstupem 1 a 2 pro směrovost v pW	32
Tabulka 72 Hodnoty výkonu mezi vstupem 1 a 3 pro směrovost v pW	32
Tabulka 73 Hodnoty výkonu mezi vstupem 1 a 4 pro směrovost v pW	32
Tabulka 74 Hodnoty výkonu mezi vstupem 2 a 3 pro směrovost v pW	32
Tabulka 75 Hodnoty výkonu mezi vstupem 2 a 4 pro směrovost v pW	32
Tabulka 76 Hodnoty výkonu mezi vstupem 3 a 4 pro směrovost v pW	32
Tabulka 77 Průměrné hodnoty výkonů mezi jednotlivými výstupy	32
Tabulka 78 Hodnoty směrovosti výstupu 1 ku výstupu 3 v dB	33
Tabulka 79 Hodnoty směrovosti výstupu 1 ku výstupu 4 v dB	33
Tabulka 80 Hodnoty směrovosti výstupu 2 ku výstupu 3 v dB	33
Tabulka 81 Hodnoty směrovosti výstupu 2 ku výstupu 4 v dB	33
Tabulka 82 Hodnoty směrovosti výstupu 2 ku výstupu 4 v dB	33
Tabulka 83 Hodnoty směrovosti výstupu 3 ku výstupu 4 v dB	33
Tabulka 84 Průměrné hodnoty výkonů mezi jednotlivými výstupy	33
Tabulka 85 Průměrné hodnoty naměřených útlumů pro jednotlivé výstupy děliče před ozářením.....	34
Tabulka 86 Průměrné hodnoty naměřených útlumů pro jednotlivé výstupy děliče po ozáření.....	34
Tabulka 87 Rozdíl útlumu po a před ozářením děliče.....	34
Tabulka 88 Průměrné hodnoty celkových ztrát před ozářením.....	36
Tabulka 89 Průměrné hodnoty celkových ztrát po ozářením.....	36
Tabulka 90 Rozdíl celkových ztrát před a po ozářením děliče	36
Tabulka 91 Průměrné hodnoty homogenity ztrát před ozářením	38
Tabulka 92 Průměrné hodnoty homogenity ztrát po ozářením	38
Tabulka 93 Rozdíl hodnot po a před ozářením	38
Tabulka 94 Hodnoty výkonu mezi jednotlivými výstupy před ozářením	39
Tabulka 95 Hodnoty výkonu mezi jednotlivými výstupy po ozářením	39
Tabulka 96 Rozdíl hodnot po a před ozářením	39
Tabulka 97 Hodnoty směrovosti mezi výstupy před ozářením.....	40
Tabulka 98 Hodnoty směrovosti mezi výstupy po ozářením	40
Tabulka 99 Rozdíl hodnot po a před ozářením	41

Seznam Rovnic

Rovnice 1 Výpočet polarizační vidové disperze	4
Rovnice 2 Výpočet chromatické disperze	4
Rovnice 3 Výpočet numerické apertury	4
Rovnice 4 Výpočet vložného útlumu	24
Rovnice 5 Výpočet dělicího poměru pro výstup 1	25
Rovnice 6 Výpočet celkových ztrát výkonu	26
Rovnice 7 Vzorec pro výpočet homogenity ztrát v MS Excel	26